

2019 年度 修士論文

材質の異なるロックボルトの
力学的性能に関する基礎的研究

首都大学東京大学院
都市環境科学研究科
都市基盤環境学域
トンネル・地下空間研究室

学修番号 18851517
後藤優斗

指導教官 砂金 伸治 教授

目次

| | |
|--|----|
| 第1章 序論 | 3 |
| 1.1 研究背景,目的 | 3 |
| 1.2 論文構成 | 7 |
| 参考文献 | 8 |
| 第2章 既往研究 | 9 |
| 2.1 各種ロックボルトの引抜き付着強度実験..... | 9 |
| 2.1.1 実験材料 | 9 |
| 2.1.2 ロックボルト付着強度の実験・評価方法..... | 11 |
| 2.1.3 実験結果と考察..... | 12 |
| 2.1.4 まとめ | 14 |
| 2.2 模型実験による土砂地山トンネルにおけるロックボルト効果に関する一考察 | 15 |
| 2.2.1 実験概要 | 15 |
| 2.2.2 実験結果 | 16 |
| 2.2.3 まとめ | 20 |
| 2.3 既往研究の総括..... | 21 |
| 参考文献 | 22 |
| 第3章 ゆるみ領域を模擬する材料の開発実験..... | 23 |
| 3.1 候補材料 | 23 |
| 3.2 低強度モルタル+静的破砕剤 | 24 |
| 3.2.1 低強度モルタル配合..... | 24 |
| 3.2.2 静的破砕剤混入比率..... | 25 |
| 3.2.3 実験装置 | 25 |
| 3.2.4 実験方法 | 26 |
| 3.3 ベントナイト+静的破砕剤 | 26 |
| 3.3.1 ベントナイト..... | 26 |
| 3.3.2 実験ケース..... | 27 |
| 3.3.3 実験装置 | 28 |
| 3.4 豊浦砂+静的破砕剤 | 31 |

| | |
|---|----|
| 3.4.1 豊浦砂 | 31 |
| 3.4.2 実験ケース..... | 32 |
| 3.4.3 実験装置 | 32 |
| 3.3.3 実験方法 | 33 |
| 参考文献 | 34 |
| 第4章 ゆるみ領域を模擬する材料の開発実験の実験結果..... | 35 |
| 4.1 低強度モルタル+静的破砕剤 | 35 |
| 4.2 ベントナイト+静的破砕剤 | 37 |
| 4.2.1 ベントナイト練混ぜの適正水量試験..... | 37 |
| 4.2.2 ベントナイト・静的破砕剤同時練混ぜ実験..... | 38 |
| 4.2.3 ベントナイト・静的破砕剤別々練混ぜ混合実験..... | 40 |
| 4.3 豊浦砂+静的破砕剤 | 42 |
| 第5章 異なるロックボルトを使用した力学的挙動に関する簡易実験..... | 46 |
| 5.1 実験材料 | 46 |
| 5.1.1 ゆるみ領域模擬材料..... | 46 |
| 5.1.2 定着域模擬材料..... | 47 |
| 5.1.3 ロックボルト..... | 48 |
| 5.2 実験器具 | 52 |
| 5.3 実験方法 | 56 |
| 5.3.1 実験ケース..... | 56 |
| 5.3.2 実験手順 | 59 |
| 第6章 異なるロックボルトを使用した力学的挙動に関する簡易実験結果・考察..... | 62 |
| 6.1 変位結果 | 62 |
| 6.2 ロックボルトに生じるひずみ結果..... | 69 |
| 6.3 実験結果の考察..... | 76 |
| 6.3.1 平均変位量..... | 76 |
| 6.3.2 ロックボルトに生じるひずみ..... | 81 |
| 第7章 結論及び今後の課題..... | 83 |
| 7.1 結論 | 83 |
| 7.2 今後の課題 | 83 |
| 謝辞 | 84 |

第1章 序論

1.1 研究背景,目的

現在用いられているトンネル工法には山岳工法，シールド工法，開削工法の三工法がある．その中でも特に山岳工法には，矢板工法と NATM の二工法が存在する．

矢板工法は NATM が広く使われるようになる以前の標準的な工法で，矢板，鋼アーチ支保工を主体とした掘削工法でトンネルを掘削していく工法である．

また，NATM は吹付けコンクリートとロックボルトを主体とした支保工を用いてトンネルを掘削していく工法で，Rabciewicz によってオーストリアで概念が提唱され，1970～80 年頃に広く使われるようになった．

矢板工法と NATM の大きな思想の違いはその支保構造に現れていると考えてよく，特に矢板工法では原則的に使用されていなかったが，NATM では新しく支保部材として吹付けコンクリートとロックボルトが使用されている．これらの部材には多岐にわたる性能が求められており，特にロックボルトの性能と効果についてはトンネル標準示方書山岳工法編に記載されている．（表 1.1，図 1.1，図 1.2）

表 1.1 ロックボルトの性能および効果¹⁾

| 分類 | | | 概要 |
|----|--------------|----------------|---|
| 性能 | I | ロックボルトの引張抵抗性能 | ロックボルト軸方向の引張抵抗によってその方向と地山の相対変位を抑制する． |
| | II | ロックボルトのせん断抵抗性能 | ロックボルト軸直角方向のせん断抵抗によってその方向と地山の相対変位を抑制する． |
| 効果 | ① 地山の補強効果 | a:吊下げ効果 | 亀裂の発達した中硬岩，硬岩地山の場合には，亀裂によって区切られた不安定な岩塊を深部の地山と一体化し，其の剥落や抜け落ちを抑止する． |
| | | b:縫付け効果 | |
| | | c:地山物性の改良効果 | 中硬岩，硬岩地山の場合に，亀裂に交差してロックボルトを打設すると，亀裂面のせん断強度が向上し，物性改良効果を期待できる．また，強度の小さい軟岩地山や未固結地山においても，ロックボルトの打設によって地山のせん断抵抗が向上して降伏後の残留強度も向上し，物性改良効果を期待できる． |
| | ② | 内圧効果 | 軟岩地山や未固結地山の場合，ロックボルトに発生する軸力が吹付けコンクリートを介して坑壁に作用することで内圧効果が発揮され，トンネル周辺地山の塑性化とその拡大を期待できる． |
| | ③ | 吹付け支持効果 | 軟岩地山や未固結地山の場合，ロックボルトに発生する軸力が吹付けコンクリートを介して坑壁に作用することで内圧効果が発揮され，トンネル周辺地山の塑性化とその拡大を期待できる． |

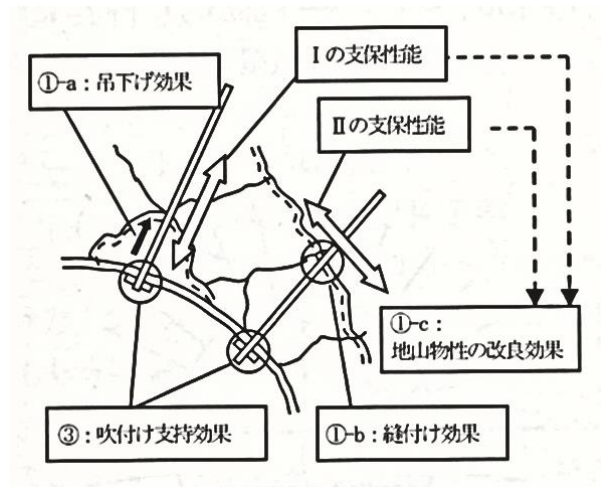


図 1.1 性能と効果の概要，中硬岩，硬岩地山

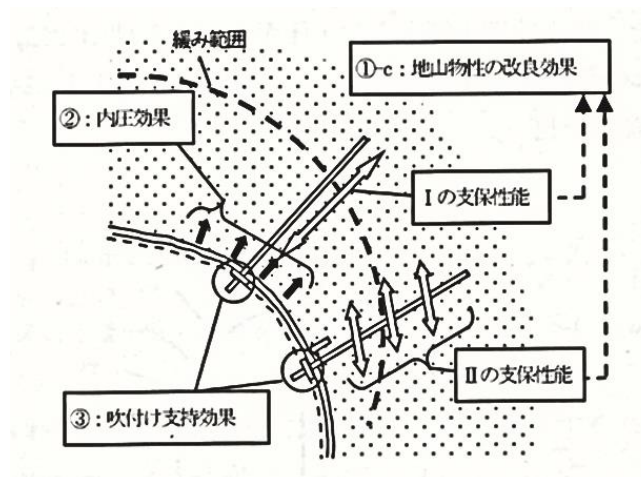


図 1.2 性能と効果の概要，軟岩，未固結地山

性能には上述のように引張とせん断が示されているものの，実際には地山全体からトンネル構造が押出しを受けた場合に発揮すると考えられる圧縮に関する性能や，摩耗や腐食など長期にわたって考慮する必要があると考えられる耐久性に関する性能なども考慮すべきであると考えられる。

一方でトンネルを設計する際に用いる標準支保パターンは以下の表 1.2 の通りである。

表 1.2 高速道路二車線トンネルの標準的な支保パターンの例（ロックボルトのみ抜粋）²⁾

| 地山等級 | 支保 パターン | 標準一 掘進長 (m) | ロックボルト | | | | |
|------|------------|-------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|---------|
| | | | 長さ (m) | 耐力 (kN) | 施工間隔 | | 施工範囲 |
| | | | | | 周 方向 (m) | 延長 方向 (m) | |
| B | B-a(H) | 2.0 | 3.0 | 170 | 2.0 | 2.0 | 上半 120° |
| CI | CI-a(H) | 1.5 | 3.0 | 170 | 2.0 | 1.5 | 上半 |
| CII | CII-a(H) | 1.2 | 3.0 | 170 | 1.8 | 1.2 | 上下半 |
| | CII-b(H) | | | | 1.8 | 1.2 | |
| DI | DI-a(H) | 1.0 | 3.0 | 290 | 1.8 | 1.0 | 上下半 |
| | DI-a(H) | 1.0 | 4.0 | | | | |
| DII | DII-a(H) | 1.0 | 4.0 | 290 | 1.8 | 1.0 | 上下半 |

これらよりトンネル標準示方書等，基準や要領類に記載されている性能はごく限られており，内容が曖昧な規定であった。しかしそれらには，せん断抵抗性能を記載しているにも関わらず，関係機関で設計の基準と考えられている標準支保パターンではせん断耐力に関する内容が含まれておらず，ロックボルトの引張耐力のみが示されている。

この引張耐力（ロックボルトの降伏点耐力）はロックボルトの引抜き耐力を定める際に用いられ，引張耐力と同程度となるように引抜き耐力が定められる。この引抜き耐力を用いて，ロックボルトの定着力，すなわちロックボルトとモルタルなどの定着材，定着材と地山との付着力を評価しているが，この引抜き耐力を確認する方法として引抜き試験のみが行われている。引張耐力を参考とした引抜き耐力を用いた引抜き試験以外の検証法は特に定められておらず，実際の現場ではせん断抵抗など引張抵抗以外の必要な性能について具体的に設計，検証されずに施工が行われている。

一方，山岳トンネルで基本的に使用されているロックボルトは鉄筋でモルタルを充填して地山との定着を確保している。しかし近年ではファイバーボルト，鋼管拡張型ボルトなど新材料・種類のロックボルトの適用が試みられている。しかし，性能に関する規定が曖昧で明確にされていないことにより，性能が満足されているか確認する手法が乏しく，それらを使用する際の判断基準がない状況が続いている。

そこで本研究ではロックボルトの基本的なメカニズムの検討はこれまで多く行われているが，鉄筋とは異なる材料をロックボルトに用いた場合や，定着等の効果がより発揮される場合のロックボルトがどのような挙動するか不明確なところがあるため，その点について検討を行った。具体的な検討としては，本論文では掘削時のゆるみ領域を豊浦砂と静的破碎

剤を混ぜた地山材料, ロックボルトには実際に現場で使用されている異形棒鋼 D22 と GFRP 材質の CS22S を用いて簡易的な実験を行い, ロックボルトの基礎的な力学的挙動を検討した.

この検討を通じて, 引張耐力だけでなく, せん断耐力など他の性能指標を導出し, ロックボルトに求められる性能をより明確にすることで, ロックボルトの合理的な設計・施工法に資する性能の提案を目指すことを主たる目的とする.

1.2 論文構成

本論文は7章から構成されている

第1章では、本研究の背景から目的、そして論文の構成について記述する.

第2章では、本研究の既往研究について記述する.

第3章では、本研究で使用した、ゆるみ領域を模擬する材料の開発実験について記述する.

第4章では、前章のゆるみ領域を模擬する材料の開発実験の結果について記述する.

第5章では、本研究で行った実験の実験材料、実験装置、実験方法について記述する.

第6章では、本研究で行った実験の結果についてまとめ、考察を行う.

第7章では、本研究で得られた結果と本研究の今後の課題についてまとめる.

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：トンネル標準示方書[共通編]・同解説[山岳工法編]・同解説，第3編 設計，p.89，2016.8.
- 2) 公益社団法人 土木学会：トンネル標準示方書[共通編]・同解説[山岳工法編]・同解説，第3編 設計，p.77，2016.8.

第2章 既往研究

本章ではロックボルトの種類などによる効果の違いやロックボルトの性能に関する既往研究についてまとめた。

2.1 各種ロックボルトの引抜き付着強度実験¹⁾

吉塚らの研究では、山岳トンネルのロックボルト設計に寄与できるよう、普通・高耐力の鋼製ロックボルトや GFRP ボルトなどに代表される FRP ロックボルトなどの（定着モルタルの）若材齢期における引抜き試験を行い、実験から得られた引抜き耐力や異形鉄筋の付着強度推定式などを用いることによってその付着強度特性の比較評価を行っている。この実験結果より、ふし形状などの鋼製ロックボルトの機械的性質の差異より鋼材・FRP など材質の差異による影響がロックボルトの付着強度に大きく関わっていることを確認している。

2.1.1 実験材料

(1) ロックボルト

ロックボルトには鋼製、高耐力、ふし形状、FRP の材質などによって 11 種類のロックボルトを使用している。（表 2.1, 2.2）

表 2.1 ロックボルトの詳細(鋼製ロックボルト)

| | 種別 | 外観 | | | | 機械的性質 | | | | 備考 |
|------|------------------------------|-----------------|----|--------|---------------|------------|------------|----------------------------|---------------|----------------------------|
| | | ふし形状 | 断面 | 材質 | 径 | 降伏荷重 kN | 破断強度 kN | ヤング係数 N/mm ² | 単位長質量 kg/m | |
| No.1 | 鋼製 ロックボルト ねじりふし | ねじりふし (ツイスト) | 密実 | STD510 | TD24 (M24) | 183 | 247 | 2.06×10 ⁵ | 3.5 | 一般 2 車線トンネル用 OPC モルタル |
| No.2 | 鋼製 ロックボルト ねじりふし | ねじりふし (ツイスト) | 密実 | STD510 | TD24 (M24) | 183 | 247 | 2.06×10 ⁵ | 3.5 | 一般 2 車線トンネル用 HPC モルタル |
| No.3 | 鋼製 ロックボルト ネジふし | ネジふし | 密実 | SD390 | D25 | 202 | 289 | 2.06×10 ⁵ | 3.98 | 一般 2 車線トンネル用 HPC モルタル |
| No.4 | 鋼製 ロックボルト 竹ふし | 竹ふし (異形棒鋼) | 密実 | SHD685 | D25 | 242 | 325 | 2.06×10 ⁵ | 3.98 | 高規格材料 HPC モルタル |
| No.5 | 鋼製 ロックボルト ネジふし | ネジふし | 密実 | SD700 | D19 | 201 | 240 | 2.06×10 ⁵ | 2.25 | 高規格材料 HPC モルタル |
| No.6 | 鋼製 ロックボルト ネジふし (中空) | ネジふし | 中空 | S45C | D28.5 | 200 | 250 | 2.06×10 ⁵ | 3.2 | 補助工法用 (自穿孔) HPC モルタル |

表 2.2 ロックボルトの詳細(FRP ロックボルト)

| | 種別 | 外観 | | | | 機械的性質 | | | | 備考 |
|-------|--------------------|-------------|----|------|-------|------------|------------|----------------------------|---------------|------------------------|
| | | ふし形状 | 断面 | 材質 | 径 | 降伏荷重 kN | 破断強度 kN | ヤング係数 N/mm ² | 単位長質量 kg/m | |
| No.7 | GFRP ロックボルト | ネジふし | 密実 | GFRP | D27 | (250以上) | 400 | 4.41×10 ⁴ | 0.99 | HPC モルタル |
| No.8 | GFRP ロックボルト | ネジふし | 密実 | GFRP | D25 | (180以上) | 380 | 3.50×10 ⁴ | 0.9 | HPC モルタル |
| No.9 | GFRP(中空) ロックボルト | ネジふし | 中空 | GFRP | D25 | (180以上) | 250 | 3.30×10 ⁴ | 0.63 | HPC モルタル |
| No.10 | CFRP ロックボルト | 編込による凹凸(ふし) | 密実 | CFRP | D14.7 | -- | 300 | 1.47×10 ⁵ | 0.3 | グラウンドアンカー用 HPC モルタル |
| No.11 | AFRP ロックボルト | 編込による凹凸(ふし) | 密実 | AFRP | D14.7 | -- | 240 | 6.86×10 ⁴ | 0.24 | グラウンドアンカー用 HPC モルタル |

*GFRP ボルト:耐力荷重欄()内はネジ部材を取り付けた際の破壊荷重を表し、破断荷重は素材の破断荷重を表す。

(2) 模擬岩盤（コンクリート）

この研究における室内試験では（旧）日本道路公団規格の地山等級 CI に相当する岩盤を模擬するため、材齢 28 日の圧縮強度 40N/mm^2 と比較的高強度なコンクリートを用いて模擬地盤を作製している。（図 2.1，表 2.2）なお、ロックボルト径に拘わらず、模擬岩盤内に定着長 350mm としてロックボルトを鉛直に打設している。ロックボルトを埋設するボアホールの孔径は山岳工法の標準的な径を元に 50mm としている。

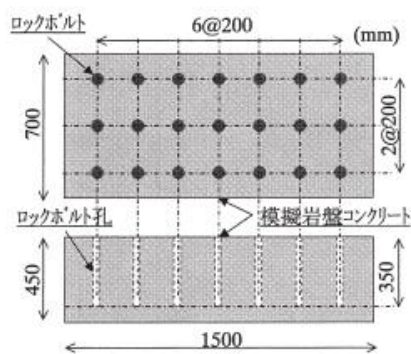


図 2.1 模擬岩盤コンクリート

(3) 定着モルタル

この研究で用いた定着モルタルの配合条件を表 2.3 に示す.

定着用モルタルの強度発現性の影響をみるために普通ポルトランドセメント (OPC) と早強ポルトランドセメント (HPC) を用いている.

表 2.3 配合条件

| | W/C % | 単位量 kg/m ³ | | | |
|------------|----------|-----------------------|-----|-----|------|
| | | W | C | S | G |
| 模擬岩盤コンクリート | 39 | 160 | 410 | 675 | 1024 |
| 定着モルタル | 33 | 304 | 921 | 921 | --- |

2.1.2 ロックボルト付着強度の実験・評価方法

(1) 実験方法

センターホール式油圧ジャッキを用いて荷重制御によるロックボルトの引抜き試験を行っている. またロックボルトの引き抜け量は高感度変位計を 2 か所に設置して計測し, 引抜き荷重はセンターホール型ロードセルを用いて計測している.

同一模擬岩盤を用いて, 定着モルタルの材齢 3, 6, 12, 24, 72 時間において各ロックボルトの引き抜き試験を 3 本ずつ実施している.

(2) 評価方法

この研究では, 打設初期にある定着モルタルの極若材齢期 (3, 6 時間) においては最大荷重から引抜き耐力および付着強度を算出している. 材齢 12, 24, 72 時間においては日本工業規格 (JIS-Z2241-1995) に基づいてオフセット量を 0.2% として引抜き耐力を評価している.

2.1.3 実験結果と考察

(1) 引抜き耐力

この研究では引抜き実験で得られた「引抜き荷重」に対する埋設長の影響を小さくするため、「引抜き荷重」を「ロックボルト埋設長」で除した「単位長耐力」で評価を試みている。図 2.2 に各ロックボルトの単位長耐力と各材齢における平均値を示している。

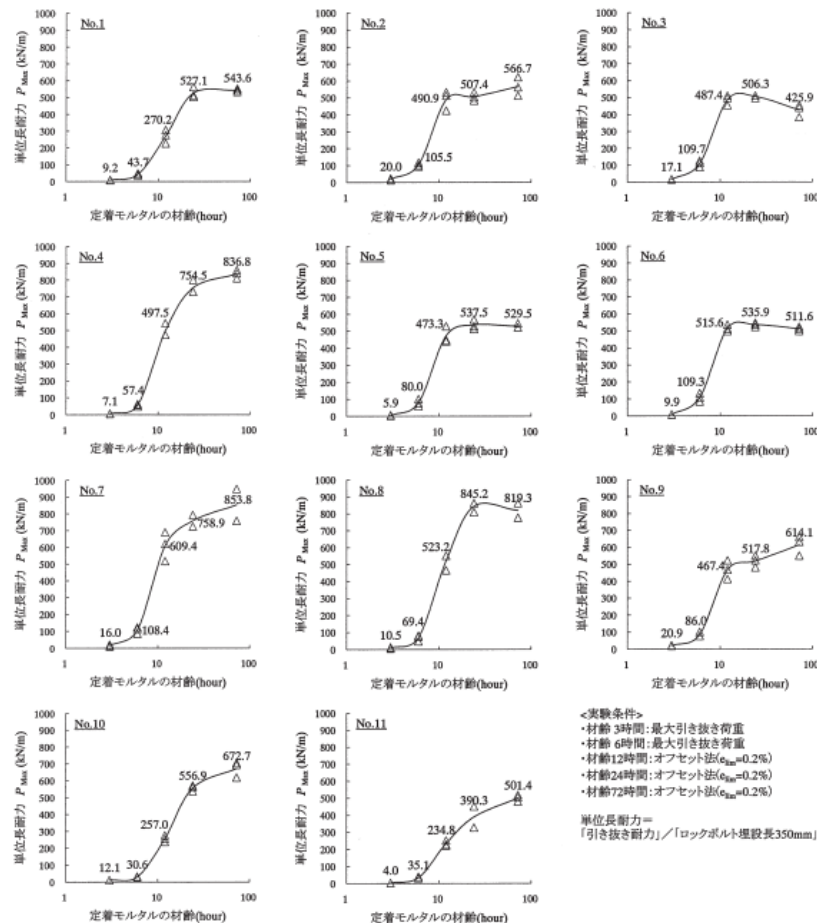


図 2.2 ロックボルトの引き抜き耐力（単位長耐力）

高耐力材料である竹ふしロックボルトに着目すると、材齢 3～12 時間までは他の鋼製ロックボルト（No.1～6）に比して同等あるいは小さい傾向にあるが、材齢 24 および 72 時間では最も大きくなっていることが分かる。さらに 24, 72 時間においては、この研究で最も高強度を示した GFRP ロックボルト（No.7,8）とほぼ同程度の引き抜き耐力を有していることが確認された。

また山岳工法で一般的に採用されている 25mm 径程度のねじりふしロックボルト（No.2）、あるいはネジふしロックボルト（No.3）は、モルタルの材齢 12 時間で谷町耐力が約 500kN/m に達し、以降では引き抜き耐力の増加は見られなかった。繊維補強プラスチックによるロックボルト（No.7～11）の引き抜き耐力は、材質・形状（直径やふし形状）によって異なり、特に材齢 6 時間までの極若材齢期にその際が著しいことが示された。

径 20～25mm 程度の一般的なロックボルトサイズでは、材齢 24 時間以降の引抜き耐力はほぼ一定方向にあった。しかしながら、比較的細径の $\Phi 14.7\text{mm}$ の CFRP・AFRP ロックボルト (No.10, 11) では、材齢 72 時間の引抜き耐力が、材齢 24 時間の引抜き耐力に比べておよそ 25%大きくなった。これは、ボアホール孔径を 50mm と一定にしたことから、他のロックボルトに比べ、ヤング係数が小さく細径の CFRP・AFRP ロックボルトでは、定着用モルタルの強度発現の影響がより顕著になったためと考えられる。

(2) 異形鉄筋の付着強度推定式との比較

この研究では RC 構造の設計において使用される異形鉄筋の付着強度推定式を用いて、ロックボルトの付着強度の特性評価を試みている。(図 2.3) グラフ中の太数字はロックボルトの付着強度 (=引抜き耐力/付着面積) を表している。

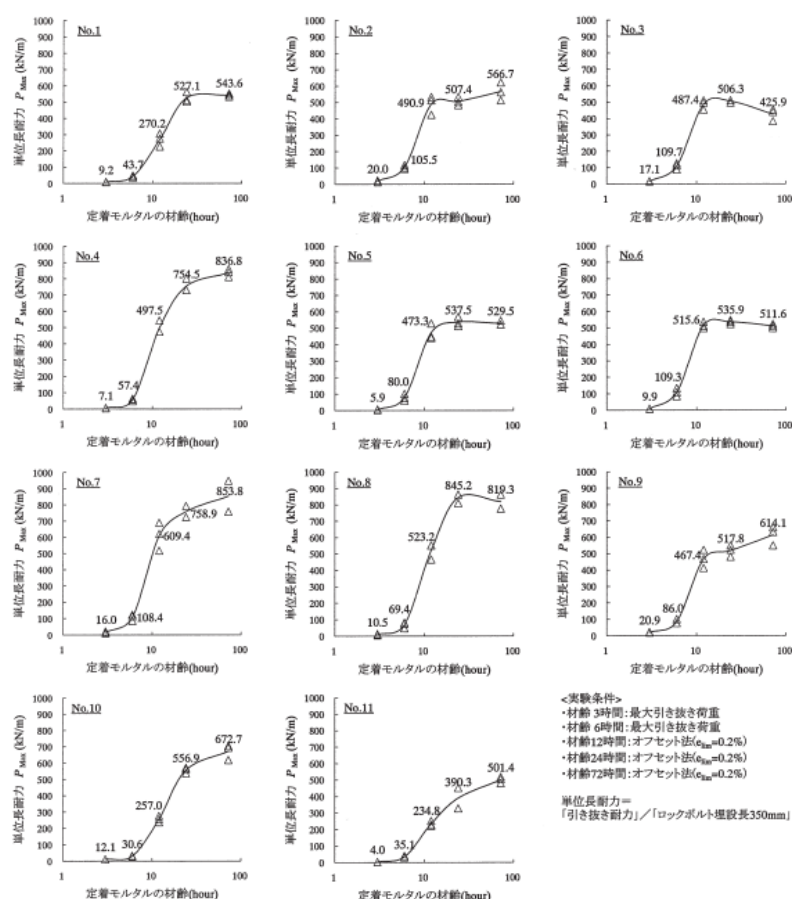


図 2.3 ロックボルトの付着強度と異形鉄筋の付着強度推定値の比較

ほとんどのロックボルトの引抜き実験において、付着強度と付着強度推定式による推定値の比が 1.0 以上に分布し、推定値より高い付着強度を示してしている。特に No.1～9 では材齢 6～12 時間において、ピーク値が 3.0～5.0 となる上に凸の曲線状となった。これは比較的若材齢のうちでは、推定値よりより極めて高い付着強度が得られるため、同推定式による評価は材齢が進行した場合においてより適切な評価が行えると考えられる。

また比較的細径の FRP ロックボルト (No10, 11) では、材齢 12 時間以降に及んでも、その値はほとんど低下せず 3.0~5.0 の範囲内にあり、他のロックボルトとは傾向が異なった。これはふし形状の相違に加え、定着用モルタルの強度発現が影響するためと考えられる。

2.1.4 まとめ

ねじりふし・ネジふしロックボルトは HPC モルタルの材齢 12 時間において単位長耐力が約 500kN/m に達し、以降は一定傾向を示した。FRP ロックボルトの引抜き耐力は材質・形状によって異なり、若材齢期に単位長耐力の差異が大きい。

一般的な径のロックボルトでは、付着強度実験値と異形棒鋼の付着強度推定値の比較において、HPC モルタルの材齢 6~12 時間において最も大きな差異を生じ、以降は徐々に小さくなっていった。

細径のロックボルトは、材齢進行に応じて高い付着強度が得られ、付着強度推定値との比較も他のロックボルトと異なる傾向であった。

2.2 模型実験による土砂地山トンネルにおけるロックボルト効果に関する一考察^{2), 3)}

森本らは土砂地山に掘削されるトンネルは、標準支保パターンは設定されておらず、合理的な設計を行うためには支保部材の効果とそのメカニズムについて明らかにする必要があると考えている。そのため森本らの研究では土砂地山トンネルにおけるロックボルトの作用効果を把握するため、ロックボルトの長さや間隔・配置などを変化させて模型実験を実施している。

その結果、トンネル模型に作用する荷重にはトンネル掘削を模擬した変位を与えることによって減少したが、ロックボルトによる荷重の低減効果を期待するためには天端部においては共下がり領域外側の自立した領域に達するロックボルト長が必要であることを確認した。また側壁部においては打設間隔についてある程度密に、ロックボルトには曲げ剛性がある材料を用いる必要があることを確認している。

2.2.1 実験概要

図 2.4 に実験装置を示す。

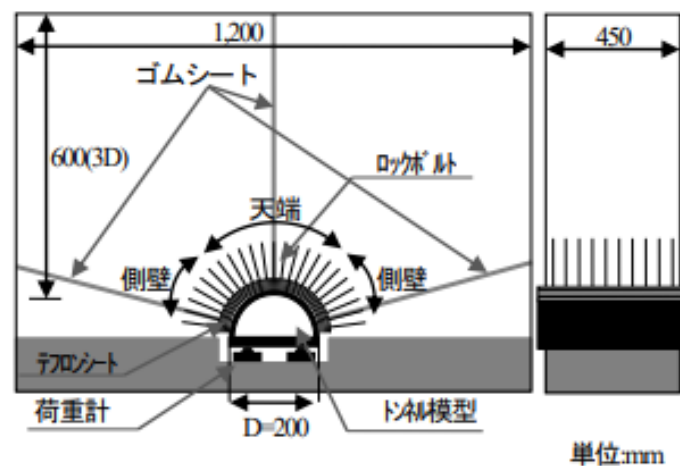


図 2.4 実験装置の概要

トンネル模型は外径 $D=200$ mm で、内寸：幅 1200mm×奥行 450mm の土槽の底面中央に設置してある。トンネル模型周辺には厚さ 0.2mm のテフロン製シートが 25 枚重ねられており、このシートを 1 枚ずつ引き抜くことでトンネル掘削を模擬している。実験ケースは地山材料に 2 種（標準砂、珪砂）を使用し、ロックボルトの長さ L 、打設間隔 α 、材料などを変化させることによって表 2.3 のように設定している。なお、奥行き方向に関してはロックボルトを 40mm ピッチで 10 断面の打設を行っている。

表 2.3 実験ケース

| 打設範囲 | 地山材料 | ロックボルト材料 | | |
|------|------|----------|-------------|------------|
| | | 材料 | 長さ L(mm) | 間隔 α(°) |
| 無対策 | 標準砂 | - | | |
| 無対策 | 珪砂 | - | | |
| 天端 | 標準砂 | リン青銅 | 300 | 7.5 |
| | 珪砂 | | 150 | 7.5 |
| | | | 150 | 7.5 |
| | | | 80 | 7.5 |
| 側壁 | 標準砂 | リン青銅 | 300 | 7.5 |
| | | | 80 | 7.5 |
| | | | 80 | 15 |
| | | PP 材 | 80 | 7.5 |

各計測項目は以下に示すである．トンネルに作用する荷重はシートを 1 枚ずつ引き抜いた各段階においてトンネル模型下部に設置した荷重計により計測している．無対策の場合には，シートの引抜きによる地山挙動を把握するため，深さ方向に一定間隔で色砂を配置し地山の変位領域について観察をしている．また，天端部及び側壁部に天然ゴムシートを埋め込み，シート表裏に貼付けしたひずみゲージにより地中ひずみの計測を行っている．

2.2.2 実験結果

(1) 無対策の場合

図 2.5 に無対策におけるトンネル模型に作用する荷重の初期荷重に対する割合と，変位量の関係について示す．

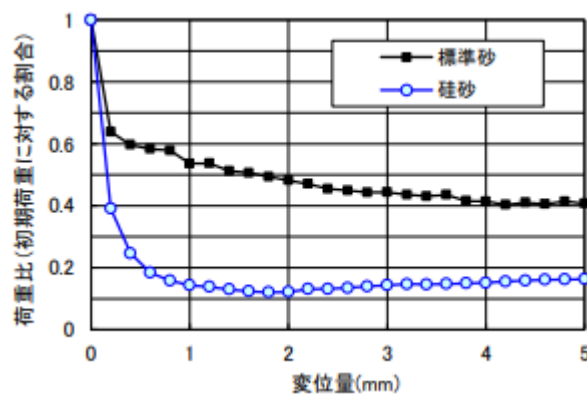


図 2.5 荷重比と変位量（無対策）

標準砂の場合，荷重比は変位量が 0.2mm で 0.6 程度まで減少し，さらに変位が増すと荷重比は徐々に低下に最終的には 0.4 となった．珪砂の場合，荷重比は変位量が 0.2mm で 0.4 程度まで大きく減少し，さらに変位を増すと 1mm 程度まで減少するが，その後はほぼ一定の値となり最終的には 0.2 程度となった．

図 2.6 に無対策における色砂の移動量を読み取った変位量等高線を示す。

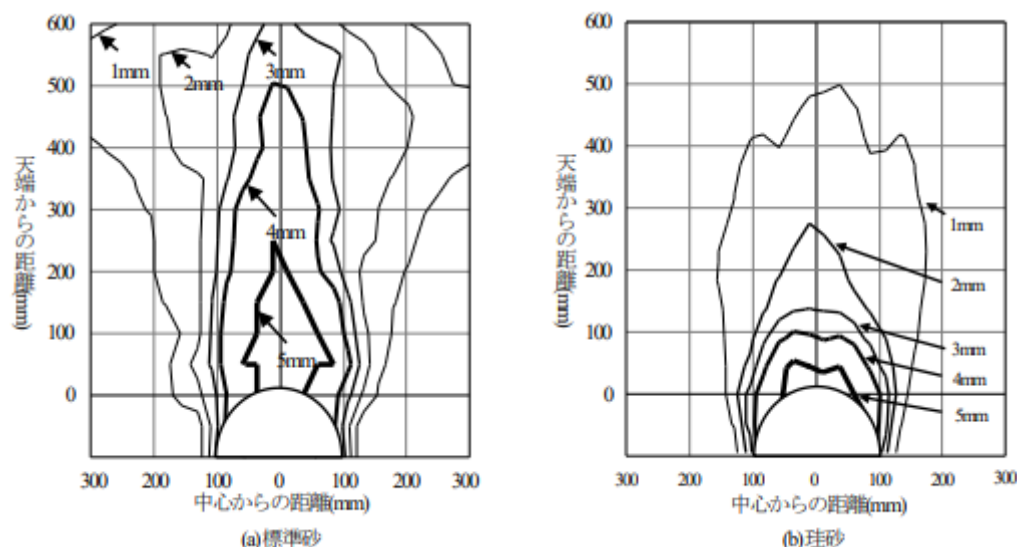


図 2.6 等変位コンター図

最終変位量と同じく、5mm 変位した領域（共下がり領域）は標準砂の場合、肩部から天端上方 250mm 程度の領域に形成される。その一方珪砂の場合、肩部から天端上方 50mm 程度の領域に形成されることを確認した。

図 2.7 に天端部における軸ひずみを示す。

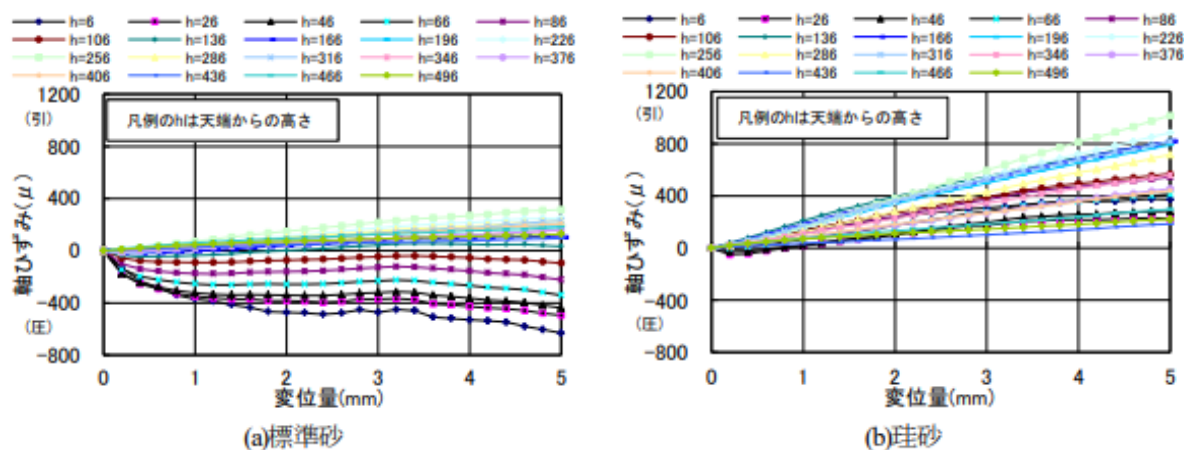


図 2.7 軸ひずみ

標準砂の場合、変位 0.2mm でトンネル模型端部から高さ 226mm を境にそれより低い領域が圧縮域となり、それより高い領域が引張域となった。その後最終変位量では高さ 106mm を境にそれより低い領域が圧縮域となり、それより高い領域が引張域となった。珪砂では、変位 0.2mm で高さ 66mm を境にそれより低い領域が圧縮域になり、それより高い領域が引張域となった。その後、最終変位量では全域で引張域となった。

ゴムシートが地山と一体となって挙動していると仮定すると、圧縮となる領域は掘削を模擬した変位と同様またはそれ以上に地山が変形していると考えられることから、共下がり領域と考えることができる。また、引張となる領域は掘削を模擬した変位により小さく変形していると考えられることから、地山は変形しているものの地山側に自立しようとする領域と考えることができる。このことから、標準砂、珪砂の共下がり領域高さは、図 2.6 から把握した値と比較すると多少の違いはあるものの、全体の傾向としては概ね整合している。

図 2.8 に変位量 5mm における地山のひずみ分布図を示す。

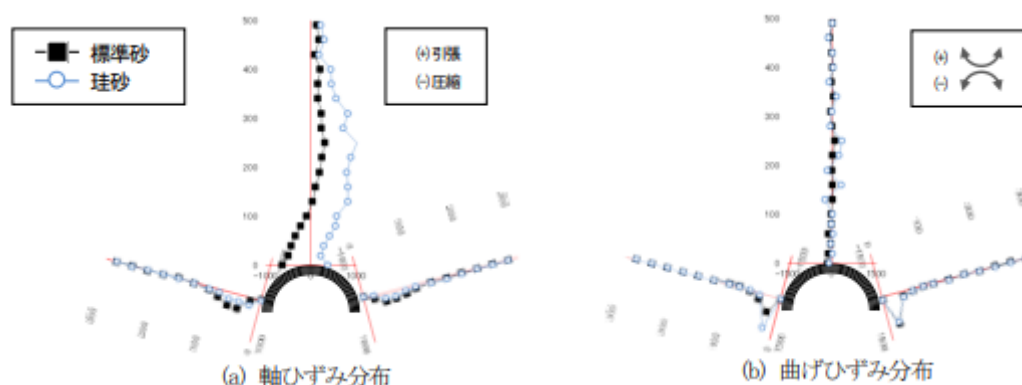


図 2.8 ひずみ分布図

軸ひずみ分布の結果から、天端部においては図 2.7 で示したとおりであり、側部については標準砂、珪砂ともにトンネル壁面から 106mm 程度まで引張の軸ひずみが確認でき、地山側に自立しようとする領域が把握できる。曲げひずみ分布の結果からは、標準砂、珪砂ともにトンネル側壁近傍に限り大きな曲げひずみが確認できる。この領域は、掘削により生じた地山のすべりによるものと考えられ、その範囲はトンネル近傍に限られる。

以上のことから、掘削により発生する共下がり領域は、標準砂の場合トンネル上方まで比較的大きく進展し、珪砂の場合はトンネル近傍に形成されることから、トンネルに作用する荷重は、標準砂は大きくなり、珪砂は小さくなると考えられる。

(2) 天端に打設した場合

天端部にロックボルトを打設するケースでは、(1) で示した共下がり領域に着目し、ロックボルトの長さを変化させた実験を実施している。なお、共下がり領域の高さは、図 2.6 より求めた標準砂 250mm，珪砂 50mm としている。

図 2.9 に天端部に打設した場合の荷重比と変位量の関係を示す。

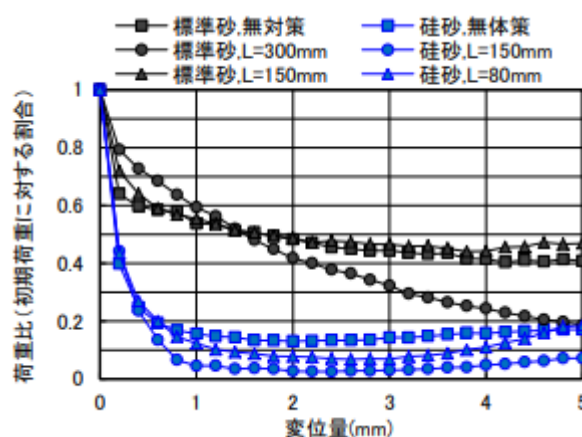


図 2.9 荷重比と変位量（天端打設）

標準砂の場合、共下がり領域は天端から 250mm 程度まで発達しており、それよりも短いボルト長さ $L=150\text{mm}$ では無対策と同程度の荷重比となり荷重低減効果が得られなかった。一方、共下がり領域よりも長い $L=300\text{mm}$ では初期段階においては効果を得られないものの、変位量が 2mm 程度以降においては効果が得られることが確認された。また、珪砂の場合、共下がり領域は天端から 50mm 程度であり、それと同程度の $L=80\text{mm}$ では初期段階から変位量が 3mm 程度までは効果が得られるものの、最終段階では無対策と同程度となった。一方、 $L=150\text{mm}$ では初期段階から最終状態まで効果が持続することが確認された。

(3) 側部に打設した場合

(1) で示したとおり、トンネル側部には、標準砂，珪砂ともに掘削により発生したすべりにより、近傍に限り大きな曲げひずみが生じている。側壁部にロックボルトを打設するケースでは標準砂の地山を用いて、打設ピッチ，およびロックボルト材料を変化させた実験を実施している。

図 2.10 に側壁部に打設した場合の荷重比と変位量の関係を示す。

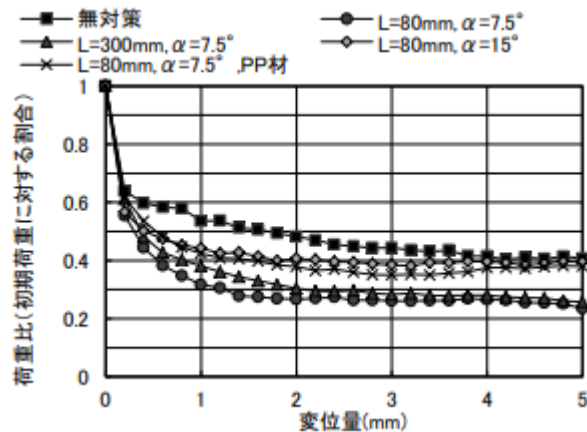


図 2.10 荷重比と変位量（側壁打設）

まず打設間隔が $\alpha=7.5^\circ$ の場合、 $L=80\text{mm}$ でも $L=300\text{mm}$ と同程度以上の十分な効果が得られた。これは側壁部においては壁面近傍にすべりが発生し、このすべりと十分に交差する長さであれば、ロックボルトのせん断抵抗による効果が現れたためと考えられる。一方、ボルト長さ $L=80\text{mm}$ で打設間隔を倍に広げた $\alpha=15^\circ$ の場合、無対策より効果はあるものの、打設間隔が $\alpha=7.5^\circ$ と比較すると効果は小さくなった。また、 $\alpha=7.5^\circ$ で、ボルト材料をリン青銅と比較し、曲げ剛性が非常に小さいポリプロピレン樹脂にした場合、無対策より効果はあるものの、リン青銅と比較すると効果は小さくなった。

2.2.3 まとめ

森本らの研究の実験結果から、ロックボルトによる荷重低減効果を期待するには、共下がり領域外側の自立した領域に達するボルト長さが必要となることが分かった。特に、天端部においては地山材料の違いにより形成される共下がり領域の高さは異なり、その領域の把握が重要となる。一方、側壁部においてはすべりがトンネル壁面近傍に形成されるため、比較的短いロックボルトでも効果が期待できること、また、打設間隔についてはある程度密にする必要があること、ロックボルトの曲げ剛性が重要であることが分かった。

2.3 既往研究の総括

吉塚らの研究では様々な種類のロックボルトを用意し、引抜き試験におけるロックボルトの付着強度に着目して、その評価をしている。その結果、材質の差異がロックボルトの付着強度に影響を及ぼすことが確認することができた。また異形鉄筋の付着強度推定式がロックボルト工において有用な資料となる可能性があることも言及している。この結果は、付着強度に直接関連するものは引抜き耐力であるため、引抜き試験がロックボルトを施工する際に非常に重要な評価方法であることを明確にしたものであると考えられる。しかし、引抜き耐力、すなわち引張耐力の記述であり、他の性能に関する言及が少ないことが現状である。

一方、森本らの研究では土砂地山におけるロックボルトの作用効果を明らかにするために実験を行い、トンネルへの作用荷重を低減するためには、ロックボルト長が共下がり領域よりも長い必要があることがわかった。また、側壁部のすべりによる曲げひずみに対しては壁面近傍に現れるため、比較的短いロックボルトでも効果が現れるが、打設間隔を密にすること、また曲げ剛性の大きい材質のロックボルトであることが重要であることが確認された。つまり土砂地山トンネルに作用する荷重の低減効果に関して、ロックボルトは長さ、打設間隔、そして曲げ剛性が重要であると結論付けている。

このように本研究では多種多様な地山における、ロックボルトの効果に関してせん断耐力、圧縮力などの引張耐力以外の性能に関して検討し、ロックボルトに求められる性能をより明確にしていくことが目的である。

参考文献

- 1) 吉塚 守, 大窪克己, 吉武 勇, 中川浩二: 各種ロックボルトの引抜き付着強度実験, 土木学会論文集 C Vol.62, No.1, pp79-84, 2006.3.
- 2) 森本 智, 真下英人, 角湯克典, 日下 敦: 模型実験による土砂地山トンネルにおけるロックボルト効果に関する一考察, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp40-43, 2011.01.
- 3) 森本 智, 真下英人, 日下 敦, 角湯克典: 土砂地山におけるロックボルト効果に関する実験的研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, pp821-822, III-411 項, 2010.9.

第3章 ゆるみ領域を模擬する材料の開発実験

本章では、本論文で行う実験において使用するゆるみ領域を模擬する材料を開発した際に行った実験について記述する。類似した研究では、模擬する地山に低強度モルタルを打設し、二次元載荷装置のようなもので外から圧力をかけて変位を与えることで掘削によるゆるみ領域の発生を模擬する方法が多く採用されていた。しかしこの方法ではトンネル掘削時のゆるみ領域の発生のメカニズムと異なるため、ゆるみを模擬できないのではないかと考えた。そこでトンネル掘削時のゆるみ領域を模擬するために材料自体が自ら変形するようなものが必要であったため、それを開発するための実験を行った。

3.1 候補材料

ゆるみ領域を模擬する材料の開発実験の候補材料として表 3.1 に示す。

表 3.1 ゆるみ領域模擬材料の開発実験の候補材料

| ケース | 候補材料 |
|-----|---------------|
| 1 | 低強度モルタル+静的破砕剤 |
| 2 | ベントナイト+静的破砕剤 |
| 3 | 豊浦砂+静的破砕剤 |

ケース 1 は既往研究でも使用されていた低強度モルタルに岩砕剤である静的破砕剤を混ぜたもの、ケース 2 は膨潤性のあるベントナイトに静的破砕剤を混ぜたもの、ケース 3 は静的破砕剤の膨張圧を吸収しないような素材である豊浦砂と静的破砕剤を混ぜたものをそれぞれ用いて行った。

静的破砕剤とは水と反応することによって得られる膨張圧を利用して、コンクリートや岩塊などを騒音を立てずに破砕、解体する際に使用されるものである。主原料は酸化カルシウム (CaO) で、膨張圧は半日経過すると発生し、徐々に増加し 3 日ほど経過すると収束する。

取扱い上、直接水をかけないこと、目や肌に絶対に触れさせないことを注意する必要がある。水を直接かけると爆発の恐れが、目や肌に付くと失明など人体に影響を及ぼす危険があるためである。そのため実験を行う際には防塵マスク、実験用メガネ、ゴム手袋を装着し安全に留意して行う。

今回の実験では株式会社太平洋マテリアルの太平洋ブライスター150 (図 3.1) を使用して実験を行った。



図 3.1 太平洋ブライスター150

3.2 低強度モルタル+静的破砕剤

3.2.1 低強度モルタル配合

開発実験で使用する低強度モルタルの配合は参考文献 2) の配合の材料や分量を変更したものを用いた。参考文献 1), 2) で使用された低強度モルタルの使用材料, 計画配合は以下の表 3.2, 表 3.3 のとおりである。

表 3.2 参考文献使用材料

| 使用材料 | 材料名称 |
|------|--------------|
| 水 | |
| セメント | 早強ポルトランドセメント |
| 細骨材 | ケイ砂 6 号 |
| 混和材 | ベントナイト |
| 混和剤 | 減水剤 |
| | 分離防止剤 |

表 3.3 参考文献低強度モルタル計画配合

| 単位量(kg/m ³) | | | | | |
|-------------------------|------|-----|------------|-----|------|
| 水 | セメント | 標準砂 | ベント ナイト | 混和剤 | |
| | | | | 減水剤 | 増粘剤 |
| 650 | 185 | 650 | 65 | 17 | 0.29 |

上記で述べたように, この参考文献の計画配合より変更した点が 2 つある。

1 つ目は使用材料の変更である。セメント, ケイ砂 6 号, 混和材ベントナイト, 混和剤分離防止剤をコンクリート研究室にある材料でなるべく元の配合の強度, 物性に寄せるように置き換えた。セメントは普通ポルトランドセメント, ケイ砂 6 号は標準砂, 混和材ベントナイトは石灰石微粉末, 混和剤分離防止剤は増粘剤で置き換え, 配合を作成した。

2 つ目はそれぞれの材料の単位量の変更である。

上述したとおり, 使用材料を変更したが, 変更することによって変更後使用材料の密度と変更前使用材料の密度が異なるため, 同量の体積でも質量は異なってくることになる。質量が異なると単位量の値も変化するため, それぞれの密度を用いて計算し, それぞれの単位量を算出した。

以上 2 点の変更点を考慮し配合計算を行った結果から, 開発実験で用いる低強度モルタルの使用材料と計画配合を表 3.4, 表 3.5 にまとめたものと決定した。

表 3.4 変更後用材料

| 使用材料 | 材料名称 |
|------|--------------|
| 水 | |
| セメント | 普通ポルトランドセメント |
| 細骨材 | 標準砂 |
| 混和材 | 石灰石微粉末 |
| 混和剤 | 減水剤 |
| | 増粘剤 |

表 3.5 変更後低強度モルタル計画配合

| 単位量(kg/m³) | | | | | |
|------------|------|-----|------------|------|------|
| 水 | セメント | 標準砂 | 石灰石 微粉末 | 混和剤 | |
| | | | | 減水剤 | 増粘剤 |
| 600 | 171 | 790 | 76 | 17.1 | 7.71 |

3.2.2 静的破碎剤混入比率

この開発実験ケース 1 では参考文献 1), 2) を参考に太平洋ブライスター150 (図 3.1) を低強度モルタルとの重量比 20%を混ぜて地山材料を作成した.

3.2.3 実験装置

(1) 鋼製モールド

地山材料打設用に Φ100mm, 高さ 200mm のもの (図 3.2) を 3 体使用する.

(2) データロガー

ひずみ, 変位測定用に株式会社東京測器研究所データロガーTDS-303 を使用する. (図 3.3)

データロガーの設定は以下の表 3.6 のとおりである.

表 3.6 データロガー設定

| | |
|---------|---------|
| 係数 | 2.000 |
| 小数点 | ###.### |
| 単位 | mm |
| センサーモード | MANUAL |



図 3.2 鋼製モールド



図 3.3 TDS-303

(3) 変位計

変位計には株式会社共和電業の定格容量 20mm
(図 3.4)の変位センサ DTH-A-20 を使用した。
以下の表 3.7 は変位計の概要である。

表 3.7 変位計概要

| | |
|------|----------------------------|
| 定格容量 | 20mm |
| 定格出力 | 5mV/V |
| | 10000×10 ⁻⁶ ひずみ |

(4) 上蓋

変位計設置のため、上蓋を用意した。
これには約 60mm×約 60mm のプラス
チック板を使用した (図 3.5)



図 3.4 DTH-A-20

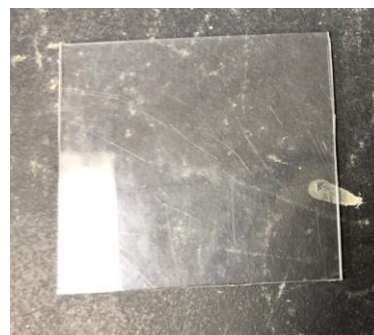


図 3.5 上蓋

3.2.4 実験方法

- ① 上記 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 で記した, 候補材料の作製, 実験装置の準備を行う。
- ② 作製した候補材料を鋼製モールドの高さ 150mm まで打設し, 表面がある程度固まるまで待つ。
- ③ 約 14 時間後, 候補材料の表面がある程度固まった段階で上蓋を表面に設置する。
- ④ 変位計をデータロガーに接続し, 変位計を上蓋に設置して値を初期化する。
- ⑤ 上蓋の変位の計測を開始する。

3.3 ベントナイト+静的破砕剤

3.3.1 ベントナイト

ベントナイトには 2 種類の粒度 (200 メッシュ, 250 メッシュ) のものを用意した。

200 メッシュは目開きが 74μm のふるいで 85%以上が通過するもの (図 3.6), 250 メッシュは目開きが 65μm のふるいで 85%以上が通過するもの (図 3.7) である。



図 3.6 250 メッシュベントナイト



図 3.7 200 メッシュベントナイト

3.3.2 実験ケース

(1) ベントナイト練混ぜの適正水量試験

初めにベントナイトと適度に反応する水の量を決めるため、ベントナイトと水のみを練混ぜ試験を行った（表 3.8）。

表 3.8 ベントナイト練混ぜの適正水量試験ケース

| | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 | ケース 4 | ケース 5 | ケース 6 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ベントナイト種類 | 250 | 250 | 250 | 200 | 200 | 200 |
| ベントナイト質量(g) | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 水量(g) | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 |

(2) ベントナイト・静的破砕材同時練混ぜ実験

(1) の試験後、2 種のベントナイトと (1) で決定した水量と静的破砕剤を用いて、それぞれを一緒に練混ぜた場合（表 3.9）の実験を行った。

表 3.9 ベントナイト・静的破砕材同時練混ぜ実験ケース

| | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 | ケース 4 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| ベントナイト種類 | 250 | 200 | 200 | 200 |
| ベントナイト質量(g) | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 静的破砕剤質量(g) | 20 | 20 | 50 | 75 |
| 水量(g) | 200 | 200 | 200 | 200 |

(3) ベントナイト・静的破砕剤別々練混ぜ混合実験

(2) 試験後、ベントナイトと (1) で決定した水量、静的破砕剤と静的破砕剤の所定の水量をそれぞれ別々に練混ぜた後、練混ぜ後のベントナイトと静的破砕材を混合し作成した場合（表 3.10）の実験を行った。

静的破砕剤を練混ぜる際の水の量は、太平洋ブライスター150 の取扱説明書の「1 袋 (5kg) に対して水 1.5L で練混ぜる」という記載に従って決定した。

表 3.10 ベントナイト・静的破碎剤別々練混ぜ混合ケース

| | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 | ケース 4 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| ベントナイト種類 | 200 | 200 | 250 | 250 |
| ベントナイト質量(g) | 400 | 400 | 400 | 400 |
| ベントナイト水量(g) | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 静的破碎剤質量(g) | 100 | 200 | 100 | 200 |
| 静的破碎剤水量(g) | 30 | 60 | 30 | 60 |

3.3.3 実験装置

(1) 計量カップ

候補材料打設用に Φ 約 95mm, 高さ 115mm のプラスチック製計量カップ (図 3.8) を 2 個使用した.

また 3.3.2 (1) のケースでは, 上部 Φ 約 65mm, 下部 Φ 約 45mm, 高さ約 90mm プラスチック製コップ (図 3.9) を使用した.



図 3.8 計量カップ

(2) データロガー

3.2.3 同様, 変位測定用に株式会社東京測器研究所データロガー TDS-303 を使用する. (図 3.3)

データロガーの設定は 3.2.3 と同じ設定である.

(3) 変位計

3.2.3 同様, 変位計には株式会社共和電業の定格容量 20mm (図 3.4) の変位センサ DTH-A-20 を使用した.

(4) 上蓋

3.2.3 同様, 変位計設置のため, 上蓋を用意し, 約 60mm×約 60mm のプラスチック板を使用した (図 3.5)



図 3.9 コップ

3.3.4 実験方法

(1) ベントナイト練混ぜの適正水量試験

- ① 2種のベントナイトをコップに、水を別の容器に計量する.
- ② それぞれのベントナイトに水を入れ、混ぜる.
- ③ 24時間後のベントナイトの様子を観察する.

(2) ベントナイト・静的破碎材同時練混ぜ実験

- ① 2種のベントナイト，静的破碎剤を計量し，混合させる（図 3.10）.



図 3.10 混合後の材料

- ② 水を計量し，容器に入れる.
- ③ 「だま」にならないように「ざる（図 3.11）」を使用して，混合させたベントナイト・静的破碎剤を3回程度に分けてふるいながら練混ぜ，練混ぜたものを計量カップに入れる.



図 3.11 ざる

- ④ 上蓋・変位計・データロガーを設置し、測定を開始する (図 3.12).



図 3.12 ベントナイト・静的破砕剤同時練混ぜ実験全体図

- (3) ベントナイト・静的破砕剤別々練混ぜ混合実験

- ① 2種のベントナイト，静的破砕剤，それぞれに加える水を計量する。
② ベントナイト，静的破砕剤を別々に練混ぜる (図 3.13, 図 3.14).



図 3.13 練混ぜ後ベントナイト



図 3.14 練混ぜ後静的破砕剤

- ③ 練混ぜたベントナイト，静的破砕材を混合させ，計量カップに入れる (図 3.15).



図 3.15 混合後の候補材料

④ 上蓋・変位計・データロガーを設置し、測定を開始する (図 3.16).



図 3.16 ベントナイト・静的破碎剤別々練混ぜ混合実験全体図

3.4 豊浦砂+静的破碎剤

3.4.1 豊浦砂

最後の候補材料として豊浦砂 (図 3.17) を用意した.

豊浦砂は旧 JIS 規格の豊浦標準砂であり, 粒度は 50 メッシュ通過分で調整されており, 単位容積重量は 1.50kg/L 以上, 比重は約 2.63 の砂である.



図 3.17 豊浦砂

3.4.2 実験ケース

豊浦砂に混ぜる水の量と，加える静的破碎剤の量を決定させるため，以下の表 3.11 のような 5 ケースで実験を行った．

静的破碎剤を練混ぜる際の水の量は，3.3.2 (3) のケース同様，太平洋ブライスター150 の取扱説明書の「1 袋（5kg）に対して水 1.5L で練混ぜる」という記載に従って決定した．

表 3.11 豊浦砂と静的破碎剤を練混ぜたケース

| | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 | ケース 4 | ケース 5 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 豊浦砂質量 | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 |
| 豊浦砂水量(g) | 0 | 60 | 120 | 60 | 60 |
| 静的破碎剤質量(g) | 100 | 100 | 100 | 50 | 200 |
| 静的破碎剤水量(g) | 30 | 30 | 30 | 15 | 60 |

3.4.3 実験装置

実験装置は 3.3.3 と同じ以下の装置を使用した．

(1) 計量カップ

候補材料打設用に Φ 約 95mm，高さ 115mm のプラスチック製計量カップ（図 3.8）を 2 個使用した．

(2) データロガー

変位測定用に株式会社東京測器研究所データロガーTDS-303 を使用する．（図 3.3）
データロガーの設定は 3.2.3 と同じ設定である．

(3) 変位計

変位計には株式会社共和電業の定格容量 20mm の変位センサ DTH-A-20 を使用した．（図 3.4）

(4) 上蓋

変位計設置のため，上蓋を用意し，約 60mm×約 60mm のプラスチック板を使用した．（図 3.5）

3.3.3 実験方法

- ① 豊浦砂，静的破碎剤，それぞれに加える水を計量する.
- ② 豊浦砂，静的破碎剤を別々に練混ぜる (図 3.18).



図 3.18 練混ぜ後の豊浦砂

- ③ 練混ぜた豊浦砂，静的破碎材を混合させ，計量カップに入れる (図 3.19).



図 3.19 混合させた後の候補材料

- ④ 上蓋・変位計・データロガーを設置し，測定を開始する (図 3.20).



図 3.20 豊浦砂+静的破碎剤実験全体図

参考文献

- 1) 玉井達毅, 外山真, 嶋本敬介, 鎌田和孝, 板谷創平: トンネル変形抑制効果を期待したロックボルトの合理的な長さに関する検討, 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 鉄道総合技術研究所, 土木学会第 72 回年次学術講演会, III-372, 2017.9.
- 2) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol.68, No.3, pp.65-79, 2012

第4章 ゆるみ領域を模擬する材料の開発実験の実験結果

本章では，前章で記したゆるみ領域を模擬する材料の開発実験の実験結果についてまとめた．

4.1 低強度モルタル+静的破碎剤

低強度モルタルと静的破碎剤のケースは低強度モルタルの練混ぜに失敗し，計測できない結果となった．

以下の図 4.1，図 4.2 のとおり，増粘剤がダメになり，標準砂とその他の材料が完全に分離し，モルタルとならなかった．

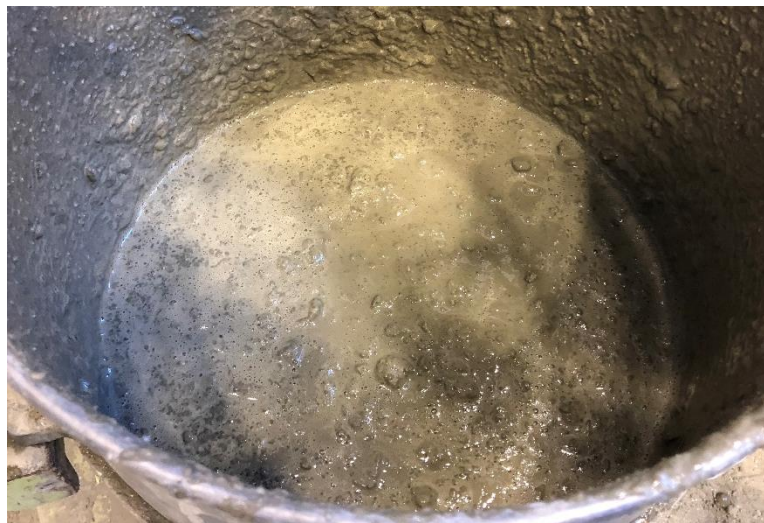


図 4.1 練混ぜ後の分離した材料



図 4.2 分離した材料の拡大図

練混ぜ失敗の原因として考えられる点としては2点ある。

1点目は練混ぜ方法の問題である。

今回はモルタルミキサーを使用して練混ぜを行い、増粘剤以外の材料に関しては通常のモルタル練混ぜと同様の工程で行ったが、増粘剤を入れる際に2～3回に分けずに1度に一気に入れて練混ぜてしまったため、ダマができてしまったと考えられる。

2点目は配合自体に問題があるのではないかという点である。

今回、参考した配合のセメント、細骨材、混和材、混和剤に関してはコンクリート研究室にないものであり、代用できる材料（普通ポルトランドセメント、標準砂、石灰石微粉末、増粘剤）で計画配合を決定した。また水セメント比 W/C が 350%以上と非常に高いものであった。この変更や W/C の高さが原因でうまく練混ぜることができなかったのではないかと考える。

またこの候補材料は低強度モルタルを使用しているため、時間経過によって硬化してしまうという欠点もあった。実際の地山ではゆるみ領域形成後、地山強度が上がるということはないため、実際の地山の状態とは異なってしまう、模擬できていないことになる。

以上、上記2点の練混ぜ失敗の原因と模擬材料が硬化して大きな強度が出るものはゆるみ領域を模擬する材料としては不適切であるという理由から低強度モルタルと静的破砕剤はゆるみ領域模擬材料として使用しないこととした。

4.2 ベントナイト+静的破碎剤

4.2.1 ベントナイト練混ぜの適正水量試験

3.3.2 (1), 3.3.4 (1) を実施し，練混ぜ後のベントナイトの様子について観察した．以下の図 4.3，図 4.4 に実験後のベントナイトを示す．



図 4.3 ベントナイト練混ぜの適正水量試験結果
(左からケース 1，ケース 2，ケース 3)



図 4.4 ベントナイト練混ぜの適正水量試験結果
(左からケース 4，ケース 5，ケース 6)

ベントナイトと水が同量のケース 1，4 はベントナイトが水を全量吸収し，水と未反応のベントナイトができてしまっていた．また水の量がベントナイトの 3 倍であるケース 3，6 はベントナイトが水を全量吸収できず，水が残ってしまっていた．

しかし水の量がベントナイトの 2 倍であるケース 2，5 では未反応のベントナイトが無く，水も残っておらず，程よく混ざっていた．またベントナイトの種類による違いは見られず，どちらのベントナイトも同じような結果となった．

よってこの試験より，ベントナイトと練混ぜる水の量はベントナイトの量の 2 倍とすることとした．

4.2.2 ベントナイト・静的破碎剤同時練混ぜ実験

3.3.2 (2), 3.3.4 (2) を実施し, 候補材料の変位を測定した.

図 4.5 から図 4.8 にその結果のグラフを示す.

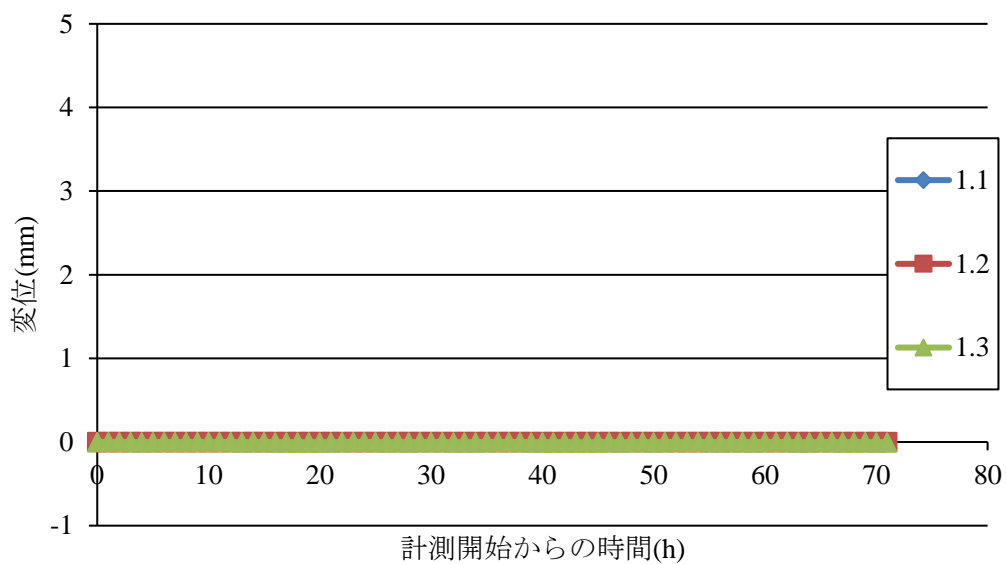


図 4.5 ベントナイト・静的破碎材同時練混ぜ実験ケース 1

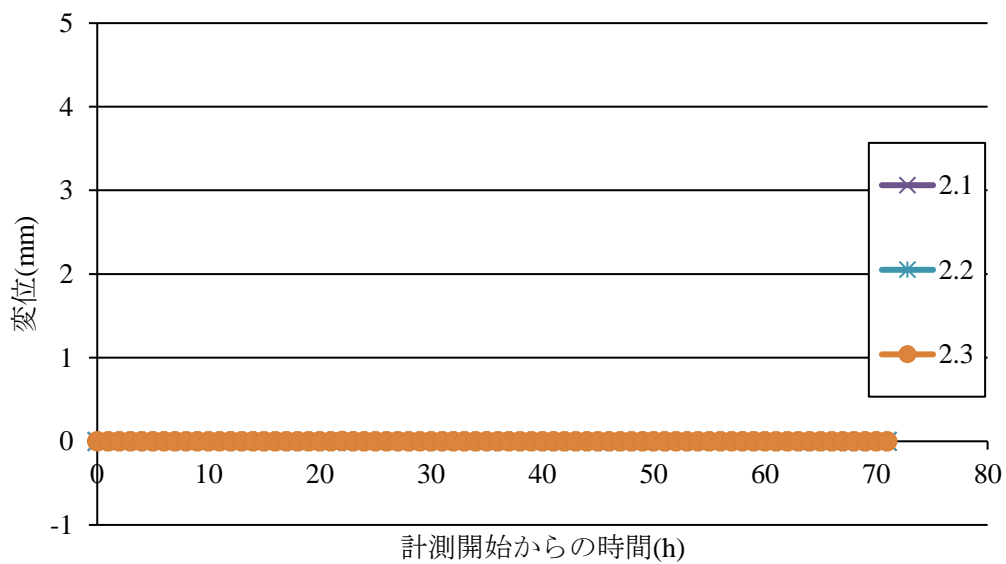


図 4.6 ベントナイト・静的破碎材同時練混ぜ実験ケース 2

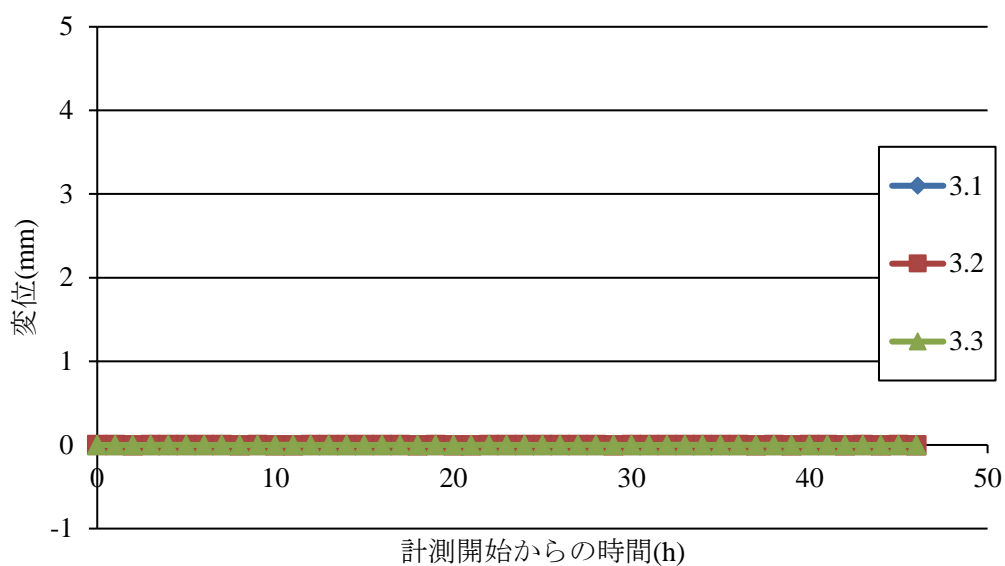


図 4.7 ベントナイト・静的破砕材同時練混ぜ実験ケース 3

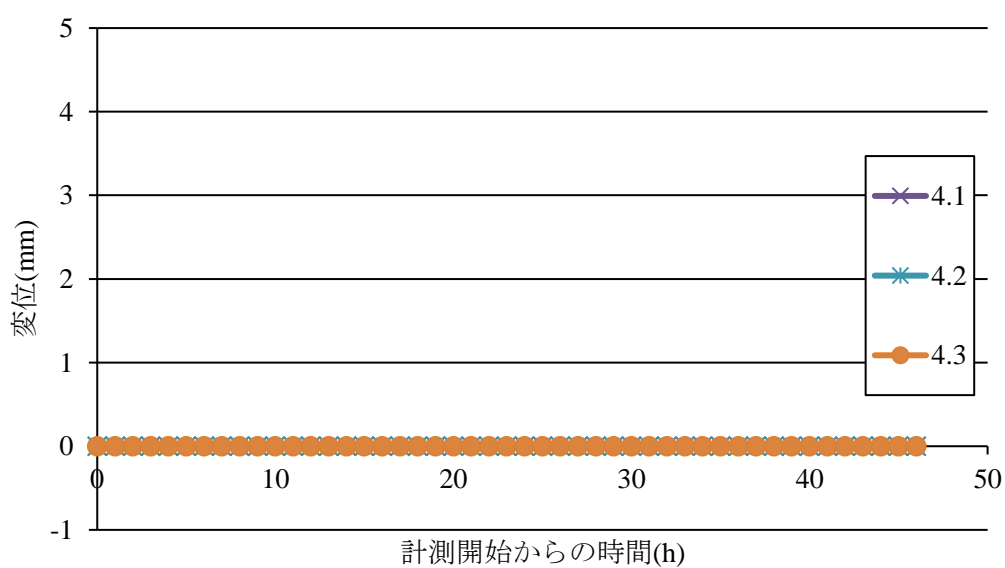


図 4.8 ベントナイト・静的破砕材同時練混ぜ実験ケース 4

上記のグラフより，どのケースも変位が出ることなく，膨張しない結果となった．

原因として考えられることは，水の量がベントナイト練混ぜ分しかなく，静的破砕剤があまり反応しなかった，水とベントナイト・静的破砕剤が反応していなかったベントナイトと静的破砕剤の相性が悪い可能性などが考えられた．

そこでベントナイトと静的破砕剤を別々に練混ぜてからそれらを混合させる実験を行うことにした．

4.2.3 ベントナイト・静的破砕剤別々練混ぜ混合実験

3.3.2 (3) を実施し、候補材料の変位を測定した。

図 4.9 から図 4.12 にその結果のグラフを示す。

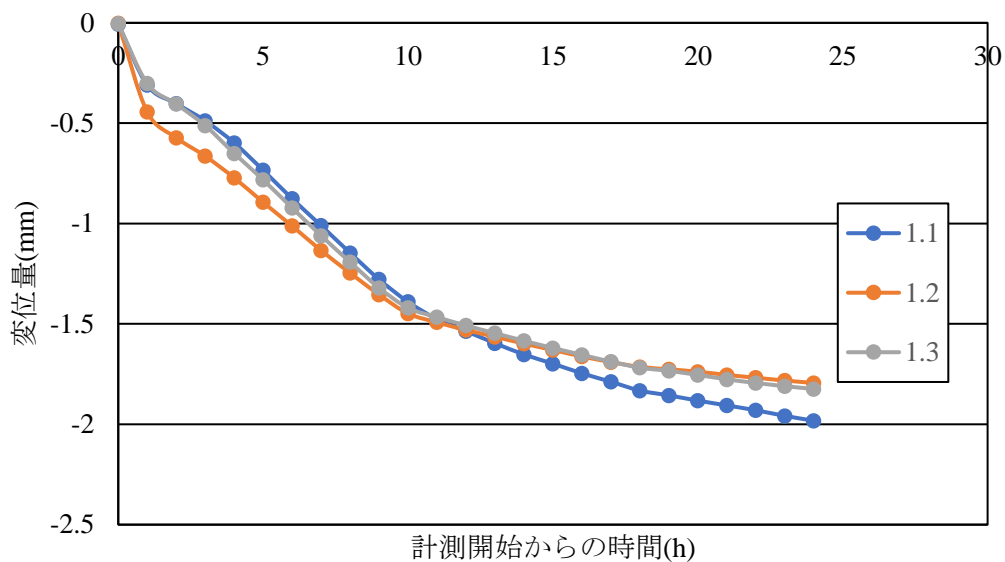


図 4.9 ベントナイト・静的破砕剤別々練混ぜ混合実験ケース 1

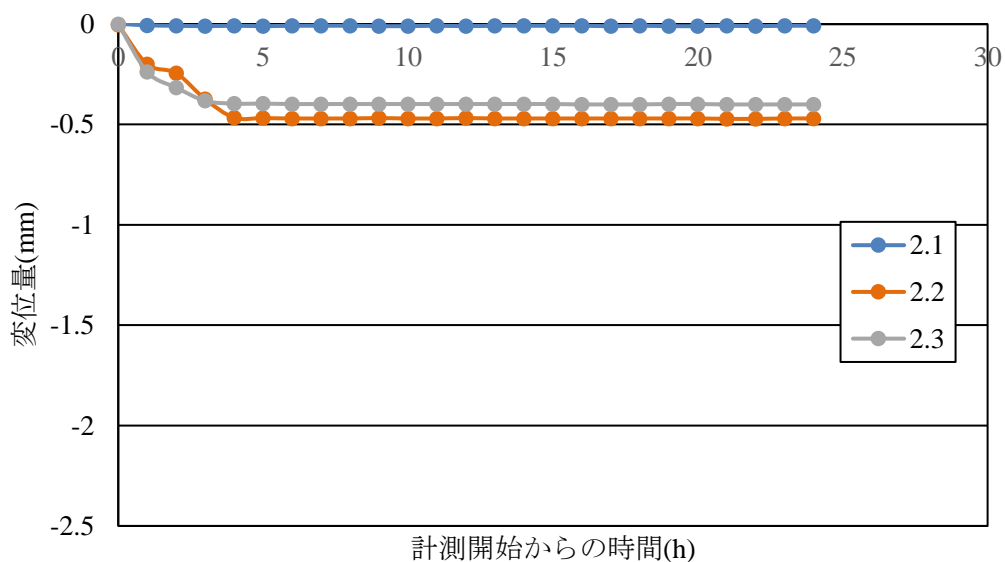


図 4.10 ベントナイト・静的破砕剤別々練混ぜ混合実験ケース 2

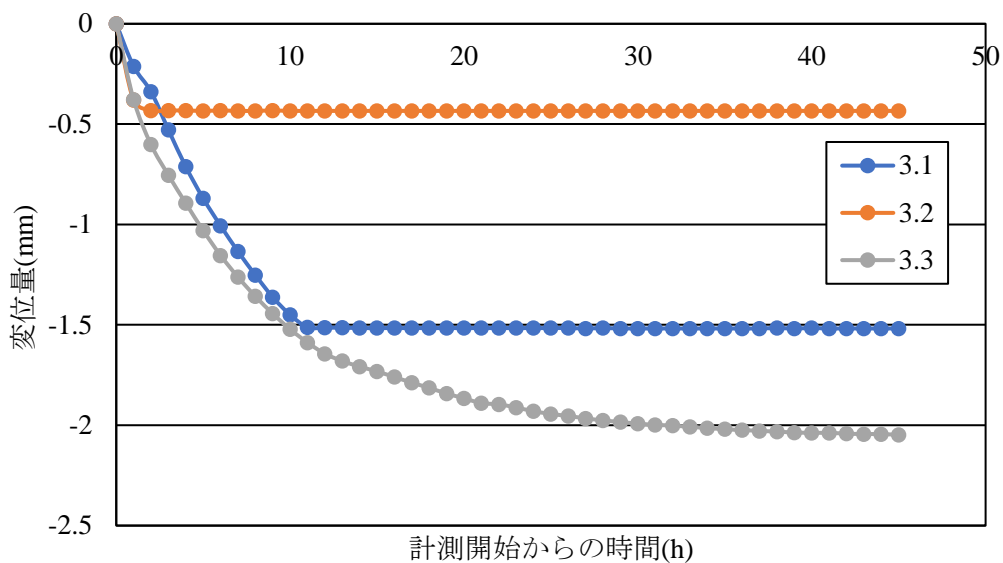


図 4.11 ベントナイト・静的破碎剤別々練混ぜ混合実験ケース 3

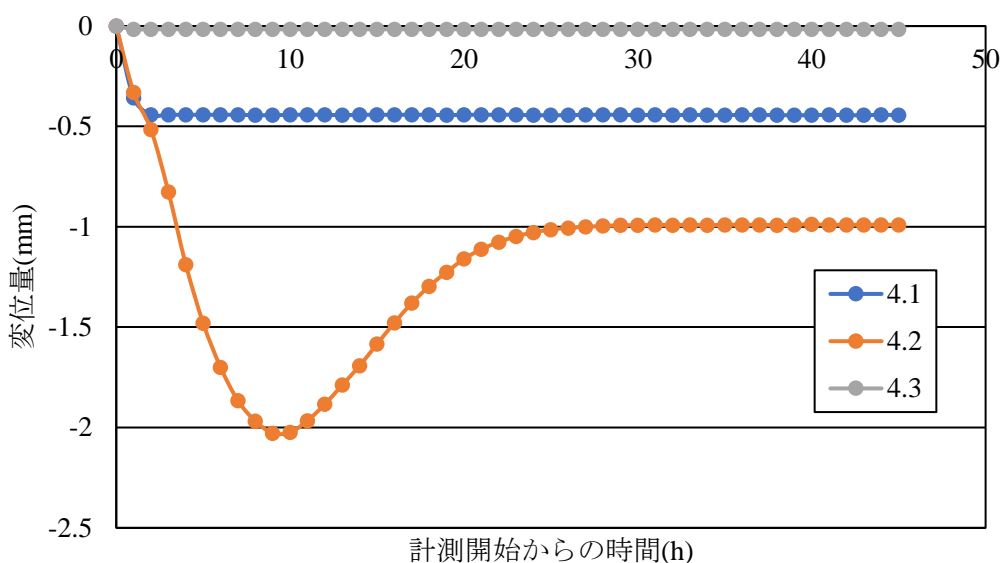


図 4.12 ベントナイト・静的破碎剤別々練混ぜ混合実験ケース 4

上記の図 4.9 から図 4.12 より，ベントナイト・静的破碎剤別々練混ぜのすべてのケースにおいて，変位がマイナスとなっており，膨張というより収縮してしまっていることが分かる．図 4.12 の 4.2 の変位計では 10 時間を経過したところから 25 時間ぐらいまで変位が上昇しているが，ほかの 4.1，4.3 をみると 4.2 と同様な変位の上昇は見られない．これは 4.2 の変位計周辺に部分的に静的破碎剤が偏ってしまったために起こってしまったと考えられる．そのためベントナイト・静的破碎剤を別々混ぜて混合させたパターンもゆるみ領域を模擬する材料としては不適切であると考えられる．

4.3 豊浦砂+静的破碎剤

3.3.3 (3) を実施し，候補材料の変位を測定した．

図 4.13～図 4.17 にその結果のグラフを示す．

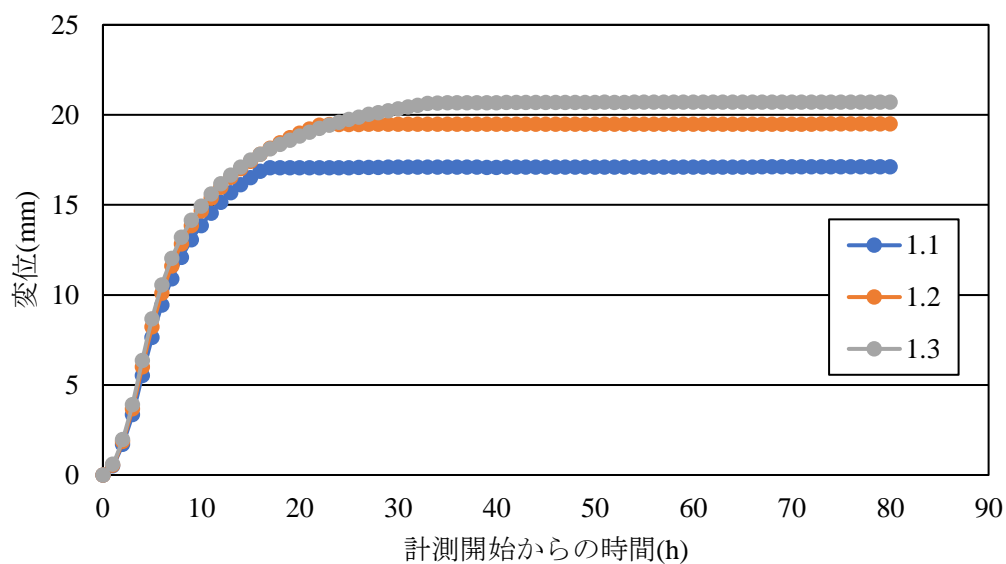


図 4.13 豊浦砂+静的破碎剤実験ケース 1

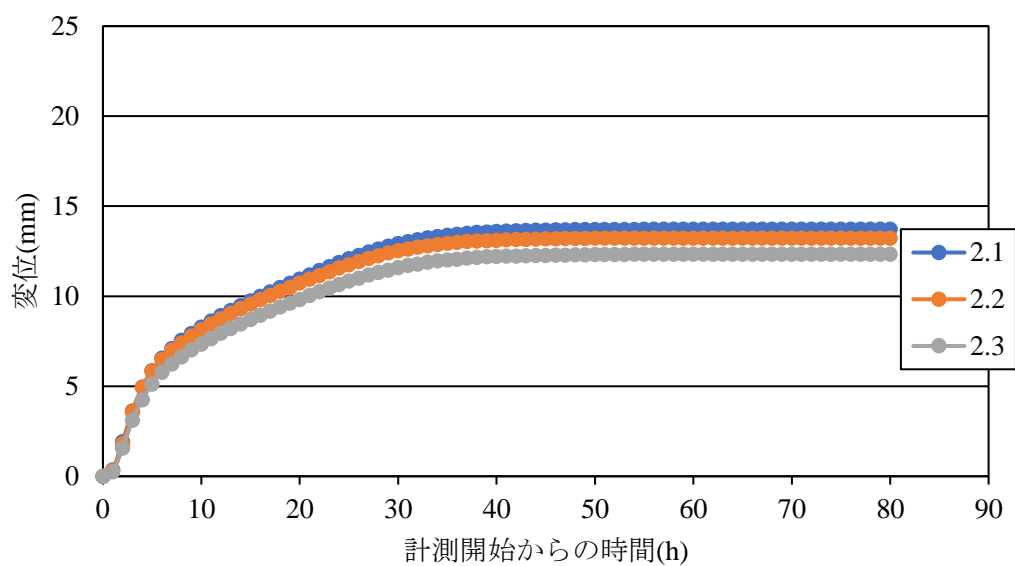


図 4.14 豊浦砂+静的破碎剤実験ケース 2

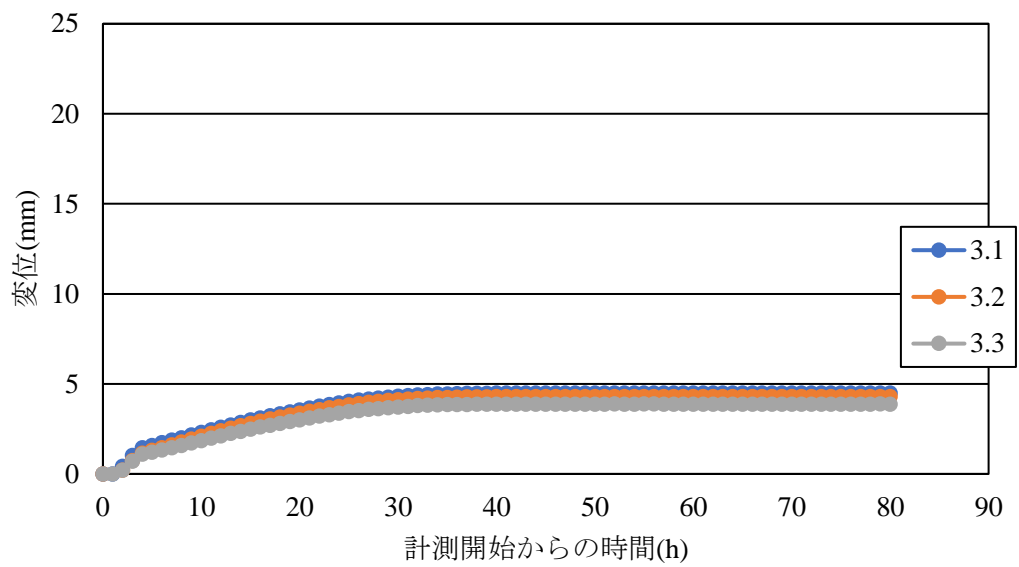


図 4.15 豊浦砂+静的破砕剤実験ケース 3

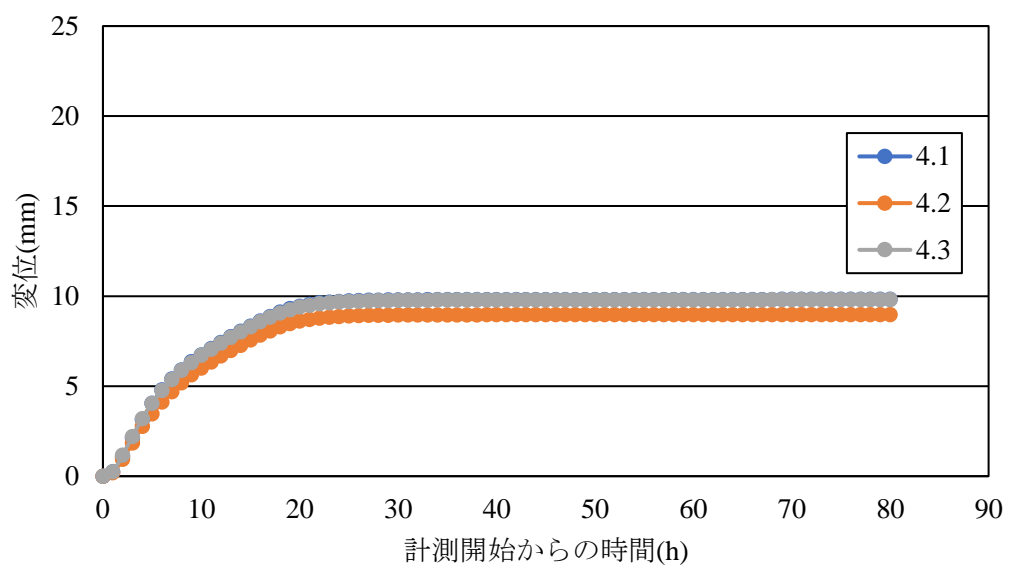


図 4.16 豊浦砂+静的破砕剤実験ケース 4

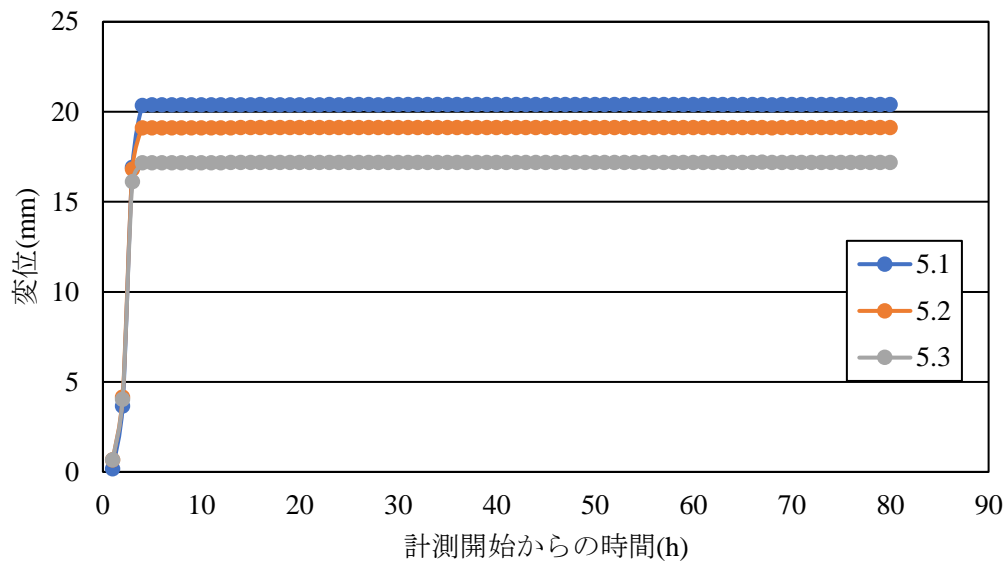


図 4.17 豊浦砂+静的破碎剤実験ケース 5

図 4.13 から図 4.17 より，どのケースでも膨張による変位が出ていることが分かる．

ケース 1 の豊浦砂に混ぜる水が無い場合は変位計の容量 20mm を超えるぐらいの変位が出ていることが分かる．しかし水が無いと材料がさらさらしすぎていて，多少の強度を期待できないものとなってしまった．そこで豊浦砂に水を含ませているケース 2 から 4 を比較することにした．

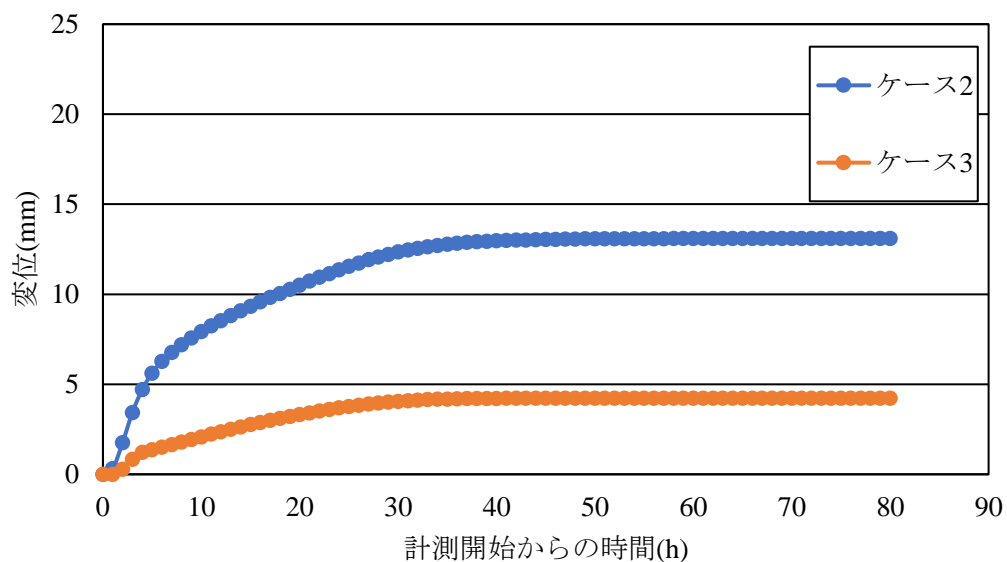


図 4.18 豊浦砂に含ませる水の量による比較
(ケース 2, ケース 3 平均変位量)

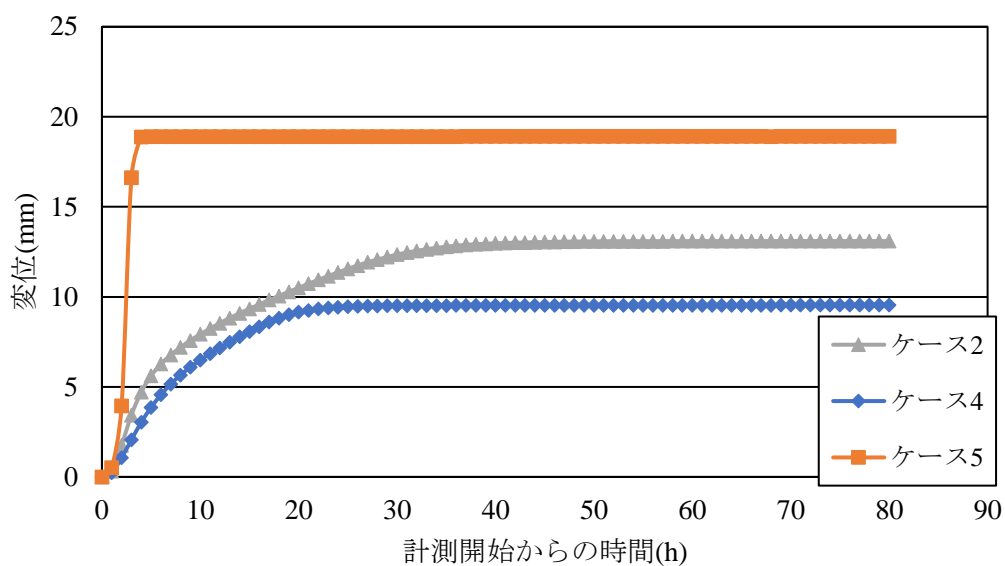


図 4.19 静的破砕剤の量による比較
(ケース 2, ケース 4, ケース 5 平均変位量)

図 4.18 より、水はケース 2 で 60g (豊浦砂の 10 分の 1)、ケース 3 で 120 g (豊浦砂の 5 分の 1) 含ませているが、水を多く含むケース 3 は変位量が 5mm 以下と少なくなっていることが分かる。

また図 4.19 より、静的破砕剤はケース 2 で 100g, ケース 4 で 50g, ケース 5 で 200g 混入させているが、静的破砕剤が多いケース 5 は初期の変位の上昇が急かつ変位計の容量 20mm を超えており、最終的な変位量がかなり大きくなっていた可能性がある。静的破砕剤が少ないケース 4 は変位量が 10mm 以下と小さくなってしまっていることが分かる。

以上のゆるみ領域を模擬する材料の開発実験結果より、水 60g, 静的破砕剤 100g で行ったケース 2 の質量比 (表 4.1) を本研究で行う実験において使用するゆるみ領域を模擬する材料とする。

表 4.1 本研究で行う実験において使用するゆるみ領域模擬材料の質量比

| | 質量比 |
|-----------|-----|
| 豊浦砂 | 60 |
| 水 (豊浦砂) | 6 |
| 静的破砕剤 | 10 |
| 水 (静的破砕剤) | 3 |

第5章 異なるロックボルトを使用した力学的挙動に関する簡易実験

本章では、ロックボルトの力学的挙動に関して検討するため、ロックボルトには実際に現場で使用されている異形棒鋼 D22 と GFRP ボルトの CG22S の2種類を、ゆるみ領域模擬材料に豊浦砂と静的破砕剤、定着域模擬材料にドライモルタルを使用して、簡易的な実験を行った。

5.1 実験材料

5.1.1 ゆるみ領域模擬材料

ゆるみ領域を模擬する材料には、前章で決定した、豊浦砂(図 5.1)と静的破砕剤(図 5.2)を表 5.1 の質量比で練混ぜたものを使用する。



図 5.1 豊浦砂



図 5.2 静的破砕剤

表 5.1 ゆるみ領域模擬材料

| | 豊浦砂 | 水（豊浦砂） | 静的破砕剤 | 水 （静的破砕剤） |
|-----|-----|--------|-------|--------------|
| 質量比 | 60 | 6 | 10 | 3 |

5.1.2 定着域模擬材料

定着域を模擬する材料には、株式会社ケー・エフ・シーの SN ドライモルタルを使用した。

(図 5.3)

ドライモルタル配合表、練混ぜ時の水セメント比は以下の表 5.2, 5.3 のとおりである。



図 5.3 株式会社ケー・エフ・シーSN ドライモルタル

表 5.2 SN ドライモルタル配合表

| | 重量(kg) | 比重 | 容量(L) |
|--------|--------|------|-------|
| 普通セメント | 9.36 | 3.16 | 2.96 |
| 特殊添加剤 | 0.64 | 2.2 | 0.29 |
| 細砂 | 10 | 2.67 | 3.74 |
| 合計 | 20 | | 6.99 |

表 5.3 SN ドライモルタル水セメント比

| 水(kg) | W/C(%) |
|-------|--------|
| 3.40 | 36.3 |

5.1.3 ロックボルト

ロックボルトには実際の現場で使用されている異形棒鋼 D22 と GFRP ロックボルトの CG22S の 2 種類を使用した。(図 5.4, 図 5.5)

それぞれ実際の現場では 3m ほどの長さのものであるが, 今回の実験ではそれらを 300mm に切断したものを使用した。



図 5.4 異形棒鋼 D22



図 5.5 GFRP CG22S

また試験の都合上, それぞれに専用のナットと CG22S にはテンションスリーブを取り付けて実験を行った。(図 5.6, 図 5.7, 図 5.8)



図 5.6 異形棒鋼 D22 用ナット M22
(長辺 35.75mm, 短辺 31.25mm, 内径 19.6mm)



図 5.7 CG22S 用テンションスリーブ
(長さ 130mm,ねじ切り 50mm,外径 35mm,内径 22mm)



図 5.8 CG22S 用ナット 六角ナット 33
(長辺 56.5mm,短辺 49.5mm,内径 29.55)

ロックボルトにはひずみ計測用にひずみゲージを貼り付けた。
ひずみゲージ貼り付けにはひずみゲージ貼り付け用の接着剤を使用した。(図 5.9)



図 5.9 ひずみゲージ用 CN 接着剤

またひずみゲージをドライモルタル中や豊浦砂，ゆるみ領域模擬材料中に埋め込むため，ひずみゲージを保護するために，株式会社東京測器研究所の SB テープと VM テープを使用した。（図 5.10，図 5.11）



図 5.10 SB テープ



図 5.11 VM テープ

ロックボルトがゆるみ領域模擬材料で埋まる 184mm のところまでおおむね 3cm 間隔となるように貼り付け、6 個設置した。また貼り付けたその 180° 反対側にも同様におおむね 3cm 間隔で 6 個設置し、合計 12 個設置した。両側のひずみゲージのうち片方の先端から No.1, No.2, . . . No.6, もう一方は先端から No.7, No.8, . . . No.12 とする。(図 5.12, 図 5.13)



図 5.12 异形棒鋼 D22 ひずみゲージ貼り付け後

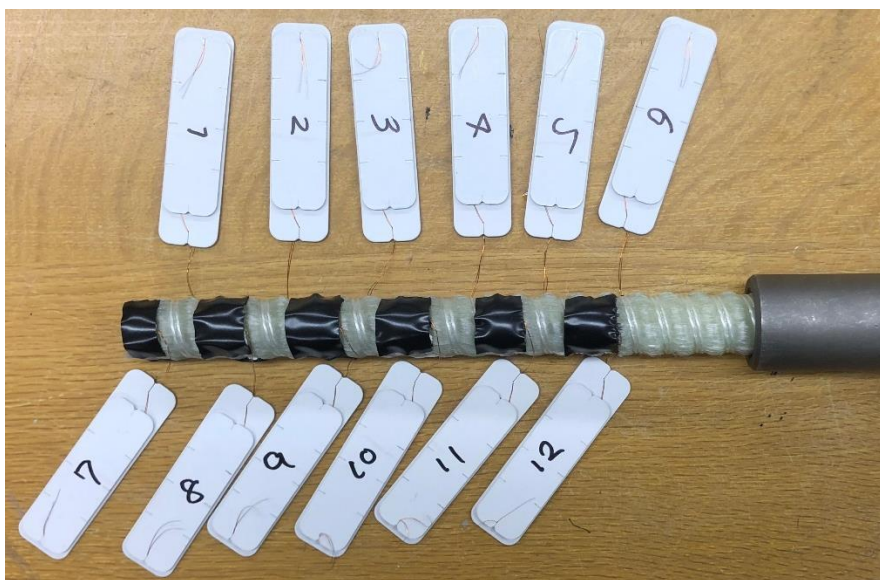


図 5.13 GFRP CG22S ひずみゲージ貼り付け後

なおひずみゲージのリード線はゆるみ領域模擬材料を詰める作業の邪魔になる可能性や実験中に絡まって切断してしまう可能性があったため、以下の図 5.14 のように一か所にまとめて接着した。



図 5.14 リード線の処理

5.2 実験器具

(1) 底付き塩ビ管

膨張モルタル打設用に $\Phi 300\text{mm}$ 、高さ 300mm のもの（図 5.15）を 2 体使用する。

定着域を模擬するドライモルタルを打設する際は、塩ビ管の内側に 0.1mm テフロンシートを 3 枚、底に 2 枚巻いて、繰り返し使用できるように塩ビ管を保護しながら実験を行った。（図 5.16）



図 5.15 底付き塩ビ管



図 5.16 テフロンシートで保護した底付き塩ビ管

(2) データロガー

ひずみ，変位測定用に株式会社東京測器研究所データロガーTDS-303 を使用した．

(図 5.17)

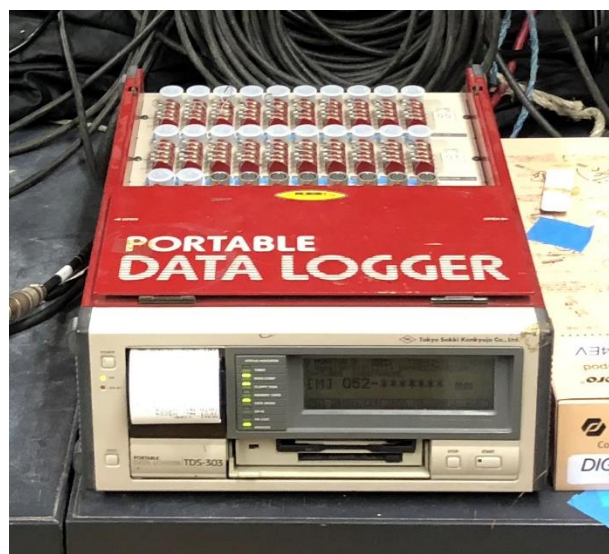


図 5.17 データロガーTDS-303

ひずみゲージ接続方法は 2 枚ゲージコモンダミー法を用いて，リード線抵抗補償，温度変化補償を行い正確な値を測定できるようにした．

ひずみゲージと変位計のそれぞれの設定を以下の表 5.4 と表 5.5 に示す．

表 5.4 データロガー設定（ひずみゲージ）

| | |
|---------|---------------|
| 係数 | 1.000 |
| 小数点 | ##### |
| 単位 | $\mu\epsilon$ |
| センサーモード | 2GCOM |

表 5.5 データロガー設定（変位計）

| | |
|---------|---------|
| 係数 | 5.000 |
| 小数点 | ###.### |
| 単位 | mm |
| センサーモード | MANUAL |

(3) 変位計

変位計には株式会社東京測器研究所の定格容量 50mm の変位径 CDP-50 を使用した。
以下に変位計の概要（表 5.6）と変位計（図 5.18）を示す。

表 5.6 変位計概要

| | |
|------|----------------------------|
| 定格容量 | 50mm |
| 定格出力 | 5mV/V |
| | 10000×10^{-6} ひずみ |



図 5.18 CDP-50 変位計

(4) ひずみゲージ

ひずみゲージには株式会社東京測器研究所の FLG-02-11-1LE を使用した. (図 5. 19)

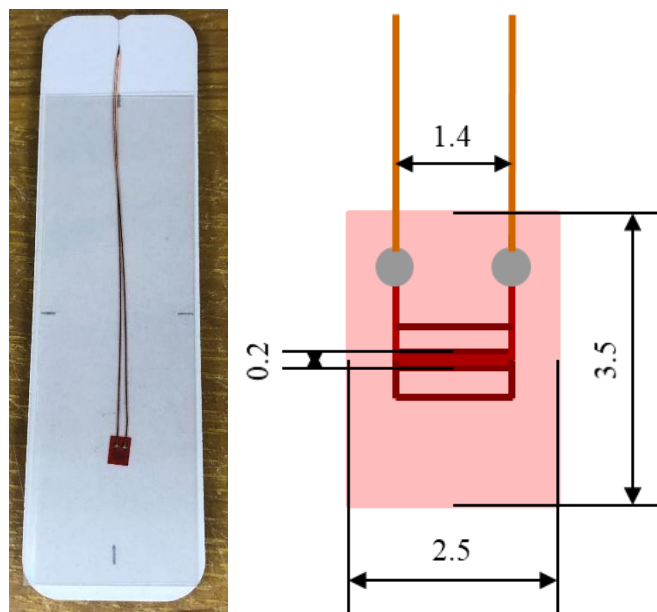


図 5. 19 ひずみゲージ (単位 mm)

5.3 実験方法

5.3.1 実験ケース

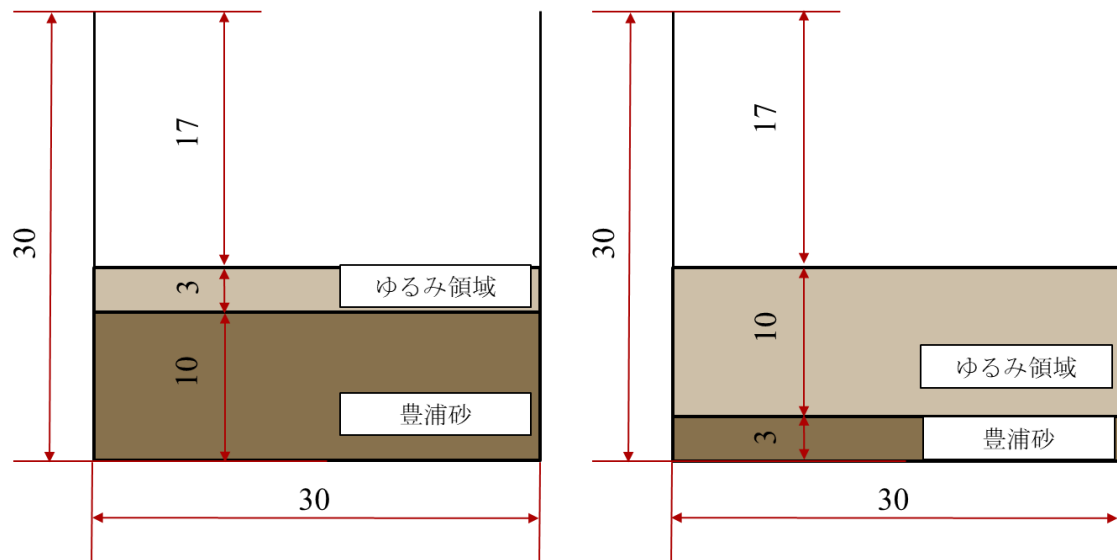
実験ケースはロックボルトの有無と種類，ゆるみ領域の大小，定着域の有無と大小によって計 14 ケース考案し，実験を行った。（表 5.7）

また実験器具の寸法，ドライモルタルや模擬地山材料，豊浦砂それぞれの層の厚さなどを以下の図 5.20 から図 5.23 に示した。

なお，ロックボルトは境界条件などを考え，底付き塩ビ管の底からロックボルト径 22mm の 3 倍の 66mm 離して設置することとしている。

表 5.7 実験ケース

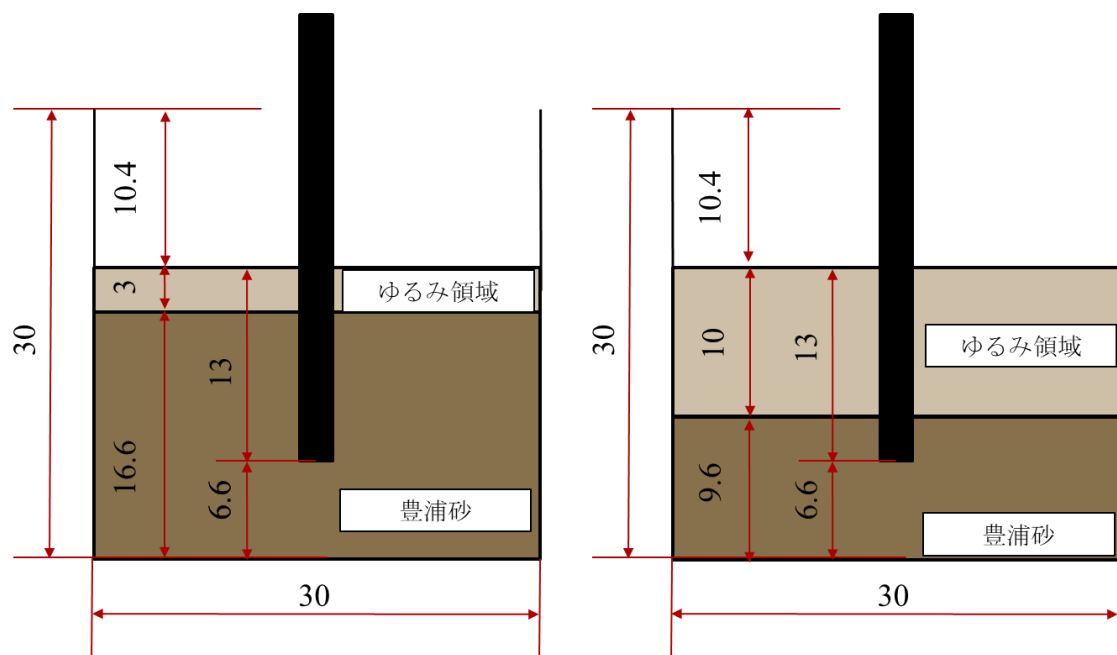
| | 定着域無 | | 定着域小 | 定着域大 |
|-----------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ゆるみ エリア 小 | <u>ケース 1</u> RB 無 | <u>ケース 3</u> D22 1 本 | <u>ケース 7</u> D22 1 本 | <u>ケース 11</u> D22 1 本 |
| | | <u>ケース 4</u> CG22S 1 本 | <u>ケース 8</u> CG22S 1 本 | <u>ケース 12</u> CG22S 1 本 |
| ゆるみ エリア 大 | <u>ケース 2</u> RB 無 | <u>ケース 5</u> D22 1 本 | <u>ケース 9</u> D22 1 本 | <u>ケース 13</u> D22 1 本 |
| | | <u>ケース 6</u> CG22S 1 本 | <u>ケース 10</u> CG22S 1 本 | <u>ケース 14</u> CG22S 1 本 |



(a) ケース 1

(b) ケース 2

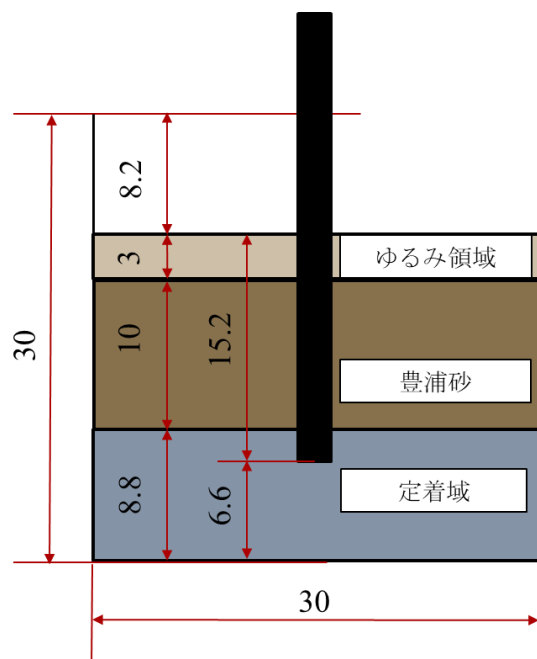
図 5.20 定着域無，ロックボルト無パターン(単位 cm)



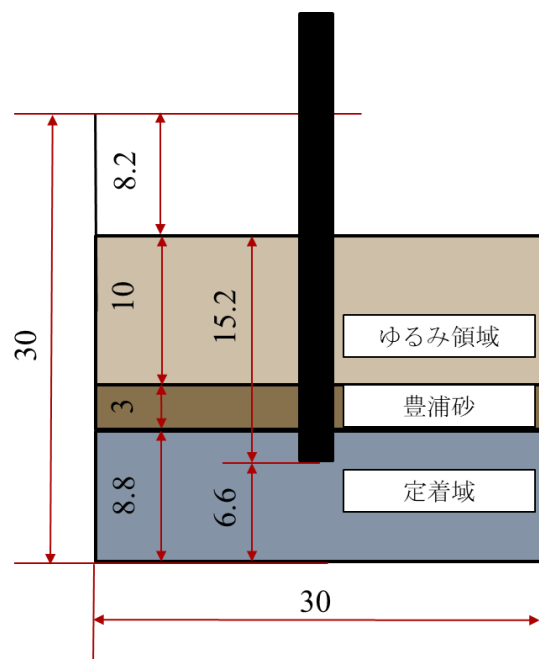
(c) ケース 3,4

(d) ケース 5,6

図 5.21 定着域無，ロックボルト有パターン(単位 cm)

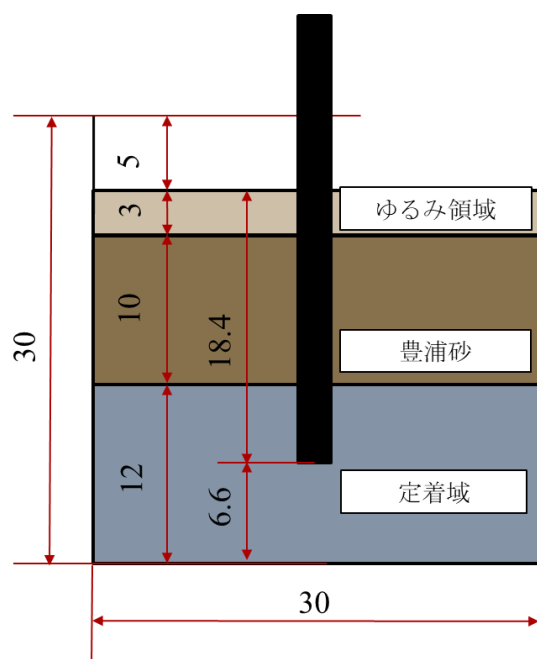


(e) ケース 7,8

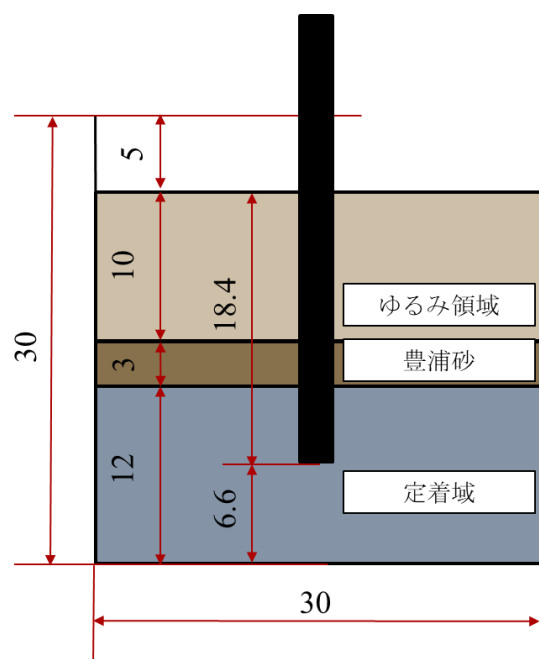


(f) ケース 9,10

図 5.22 定着域小，ロックボルト有パターン(単位 cm)



(g) ケース 11,12



(h) ケース 13,14

図 5.23 定着域大，ロックボルト有パターン(単位 cm)

5.3.2 実験手順

図 5.24 に実験フローを、手順を次の①から⑧に示す。

- ①ひずみゲージを上記 5.1.3 のように貼り付ける。
- ②ドライモルタルを打設する場合はこの段階でテフロンシートを内側に巻く。またひずみゲージをデータロガーに接続する。
- ③ドライモルタルを練混ぜ、テフロンシート巻いた塩ビ管に底から高さ 88mm（定着域大では 120mm）まで打設する。（図 5.25）
- ④ドライモルタル打設後すぐに所定の位置（定着域小では先端から 22mm，定着域大では先端から 54mm）にロックボルトを設置し，ドライモルタルが硬化するまでロックボルトがずれないように金属棒を容器に掛けるように置き，それにナットを載せることで固定した。（図 5.26）
- ⑤ドライモルタル打設後 24 時間経過後硬化を確認した後，豊浦砂を所定の位置まで入れる。定着域が無い場合はこの段階でロックボルトを設置する。設置方法は上記の方法と同様である。
- ⑥上記 5.1.1 の模擬地山材料を練混ぜ，所定の位置まで打設する。（図 5.27）
- ⑦変位計をデータロガーに接続し，動かないように磁石を用いて固定する。（図 5.28）
- ⑧ロックボルトに生じるひずみと変位の計測を開始する。

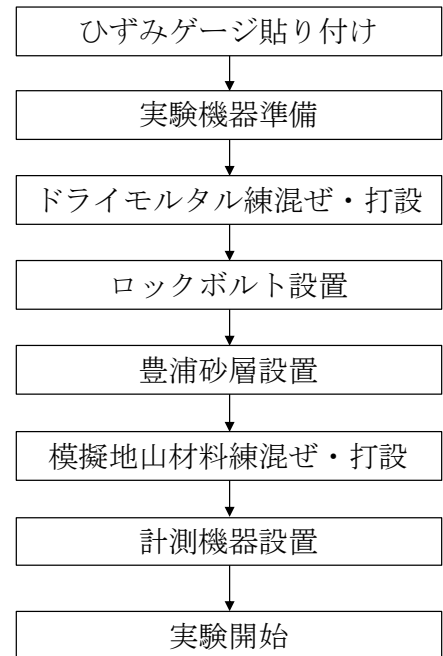


図 5.24 実験フロー

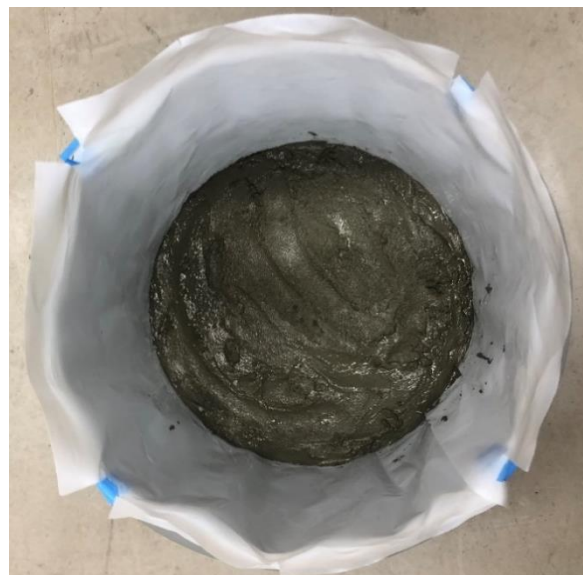


図 5.25 ドライモルタル打設



図 5.26 ロックボルト設置



図 5.27 模擬地山材料打設

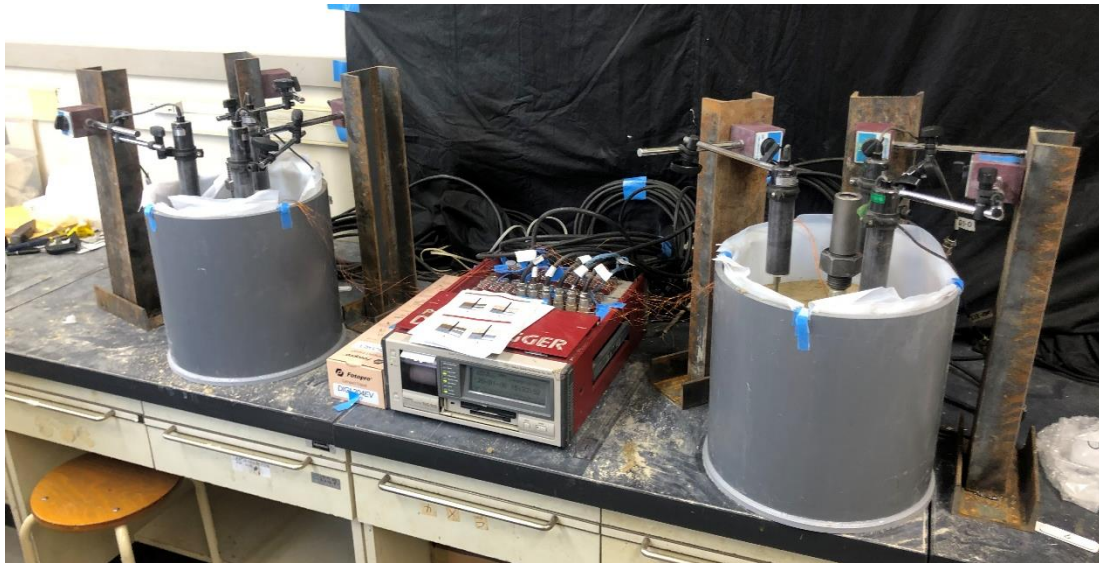


図 5.28 測定機器設置後全体図

第6章 異なるロックボルトを使用した力学的挙動に関する簡易実験結果・考察

本章では、前章で記した実験の結果についてまとめた。

6.1 変位結果

計測開始から 48 時間後までの各ケースの変位量の時間推移についてのグラフを以下の図 6.1 から図 6.14 に示す。

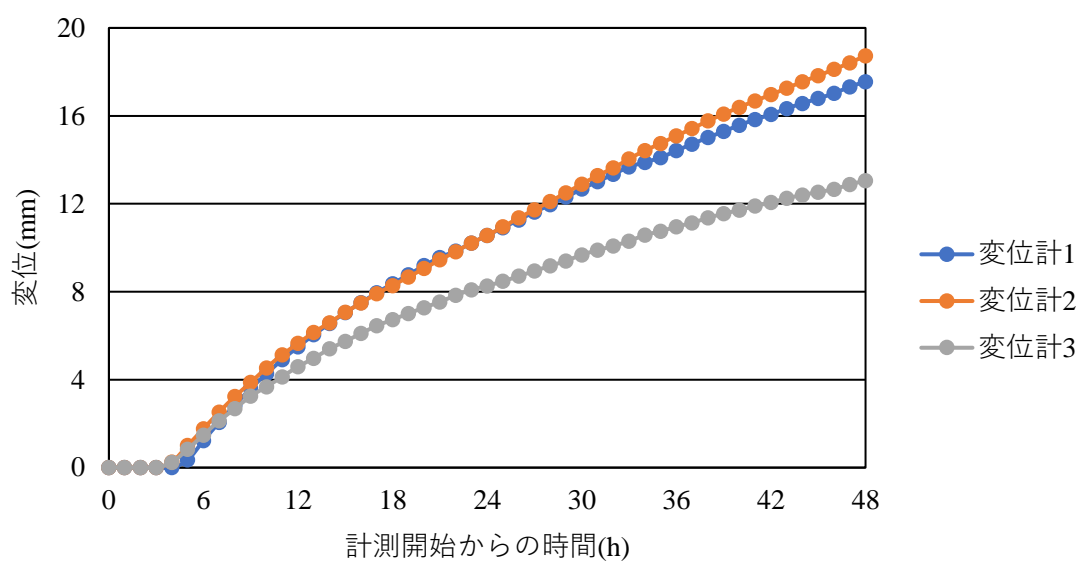


図 6.1 ケース 1（ゆるみ領域小，定着域無，ロックボルトボルト無）

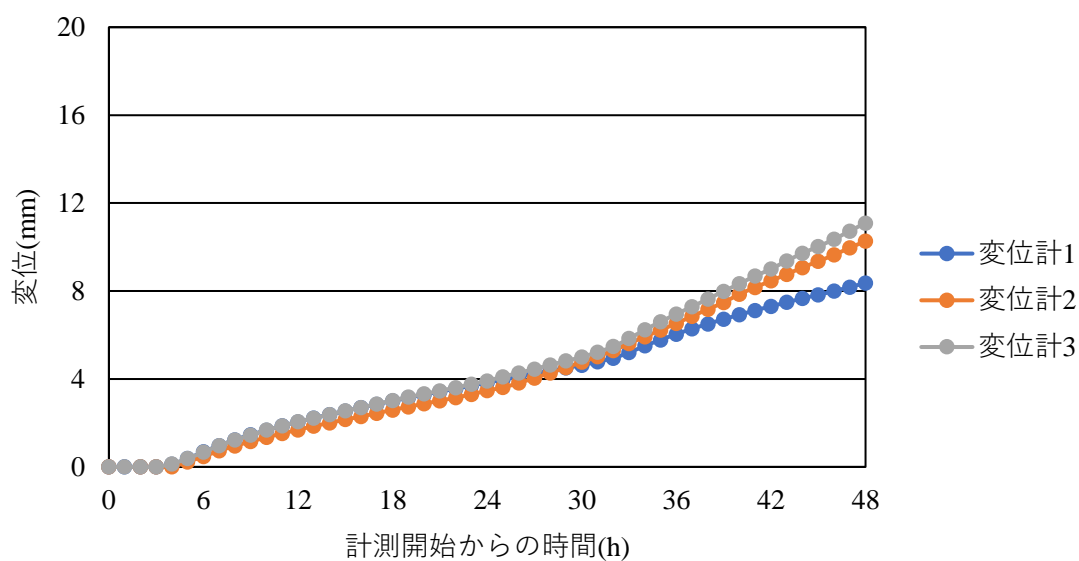


図 6.2 ケース 2（ゆるみ領域大，定着域無，ロックボルト無）

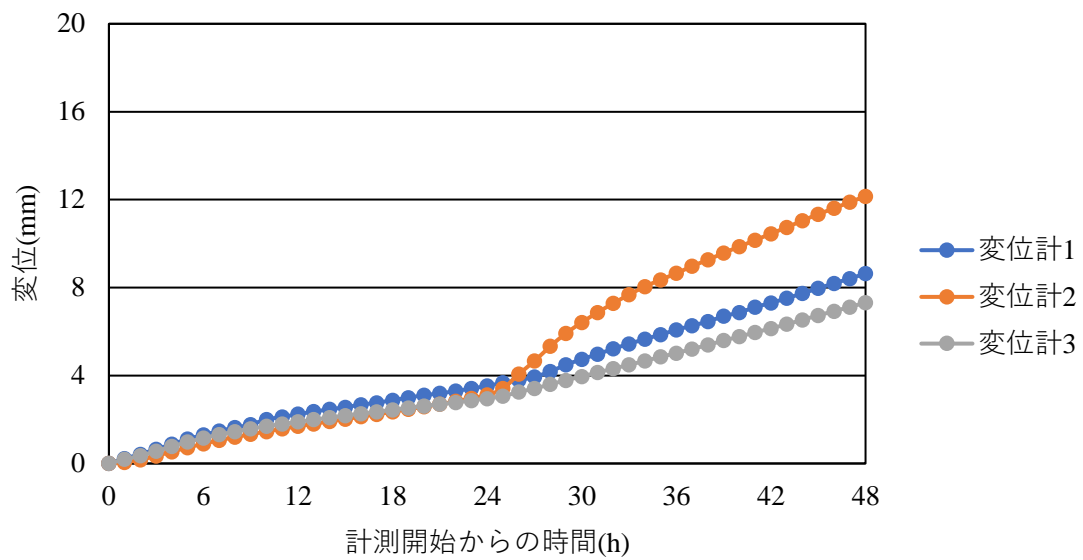


図 6.3 ケース 3 (ゆるみ領域小, 定着域無, 異形棒鋼 D22)

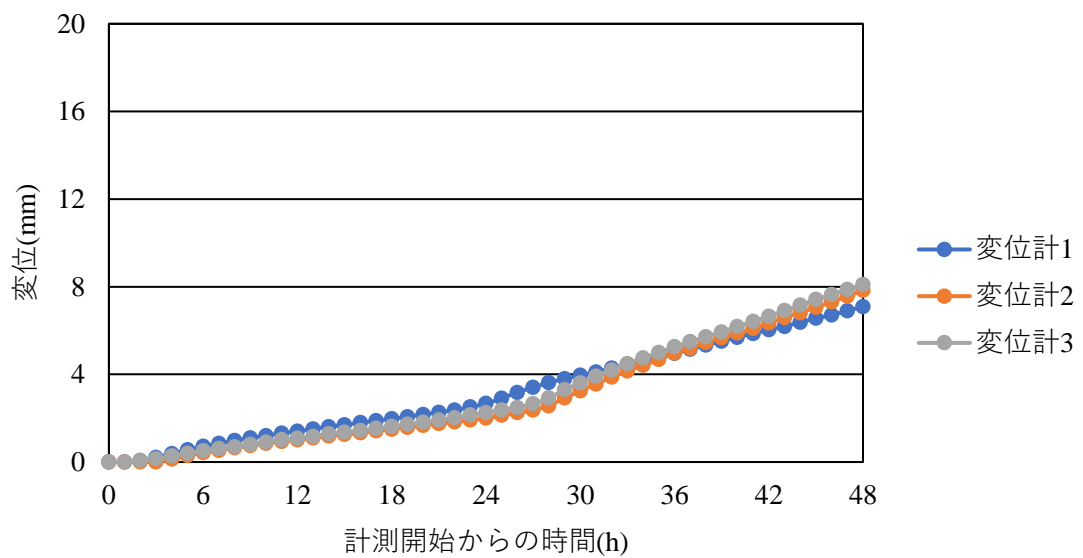


図 6.4 ケース 4 (ゆるみ領域小, 定着域無, GFRP ロックボルト CG22S)

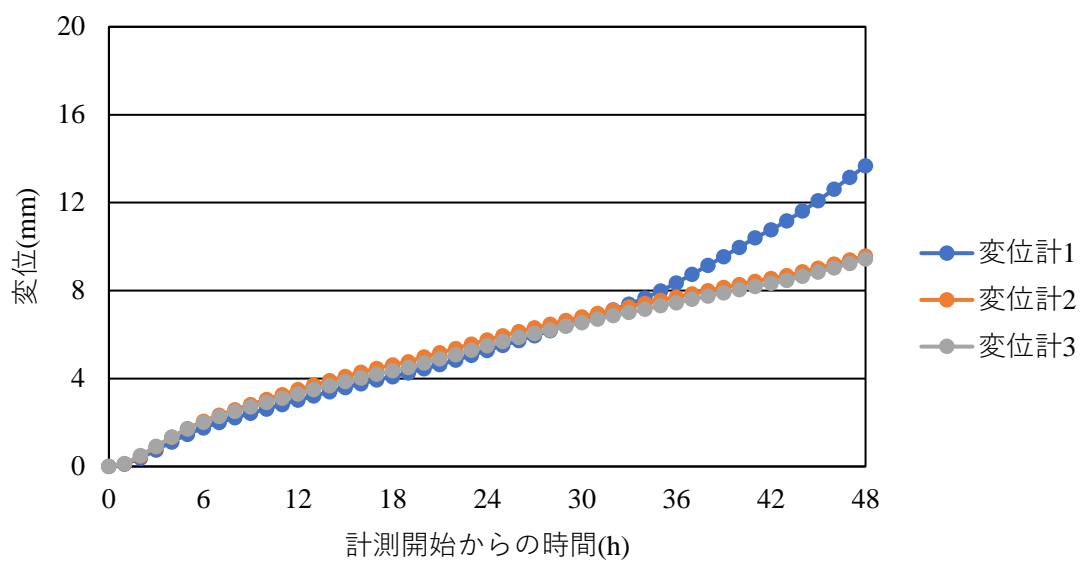


図 6.5 ケース 5 (ゆるみ領域大, 定着域無, 異形棒鋼 D22)

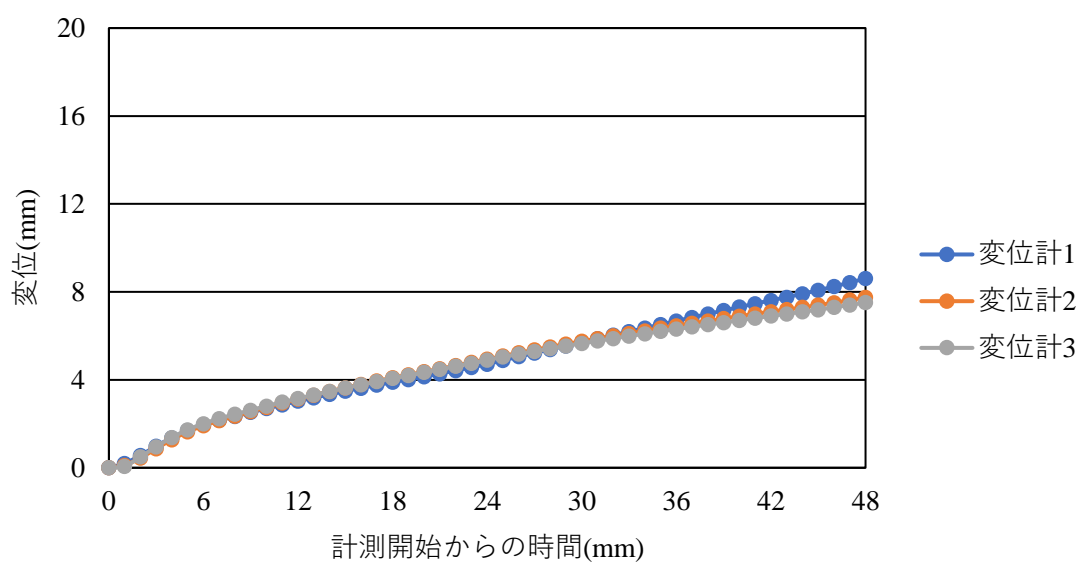


図 6.6 ケース 6 (ゆるみ領域大, 定着域無, GFRP ロックボルト CG22S)

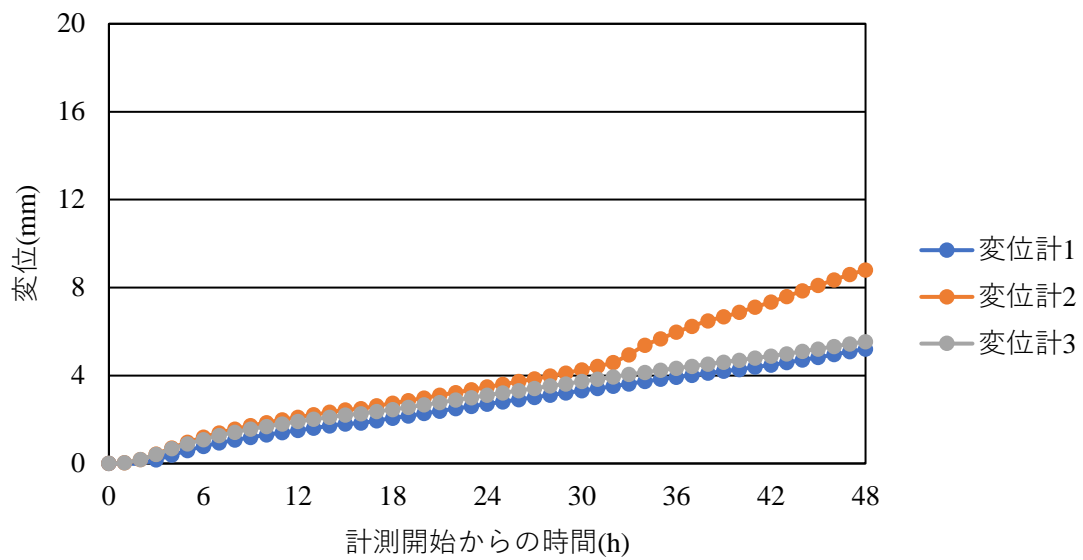


図 6.7 ケース 7 (ゆるみ領域小, 定着域小, 異形棒鋼 D22)

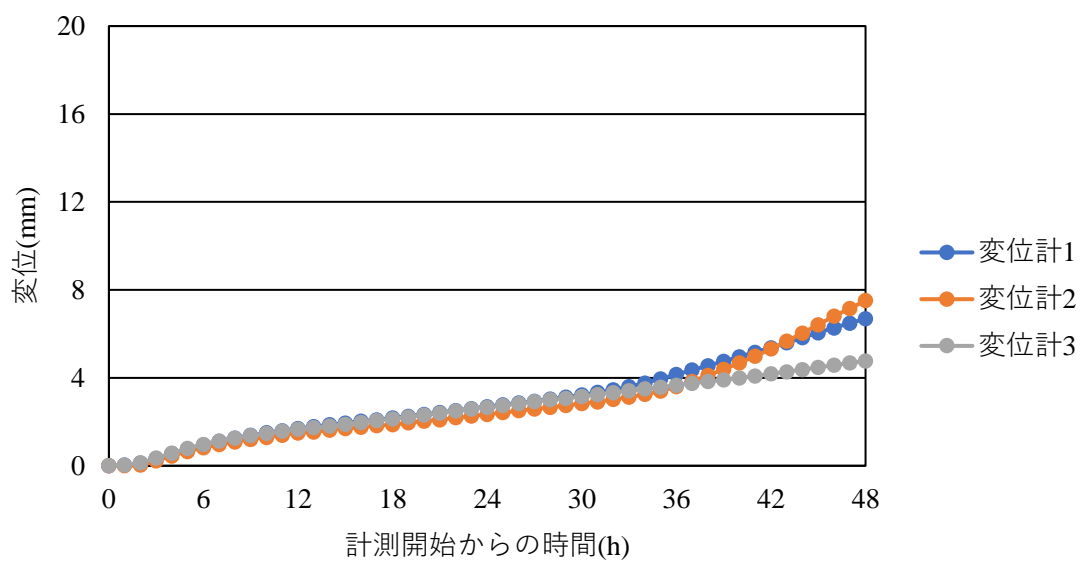


図 6.8 ケース 8 (ゆるみ領域小, 定着域小, GFRP ロックボルト CG22S)

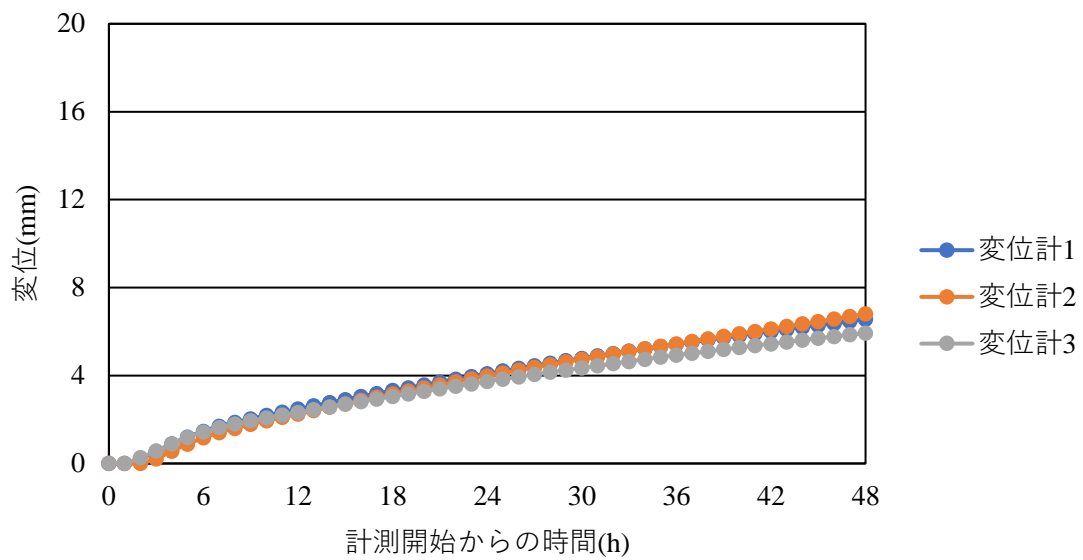


図 6.9 ケース 9 (ゆるみ領域大, 定着域小, 異形棒鋼 D22)

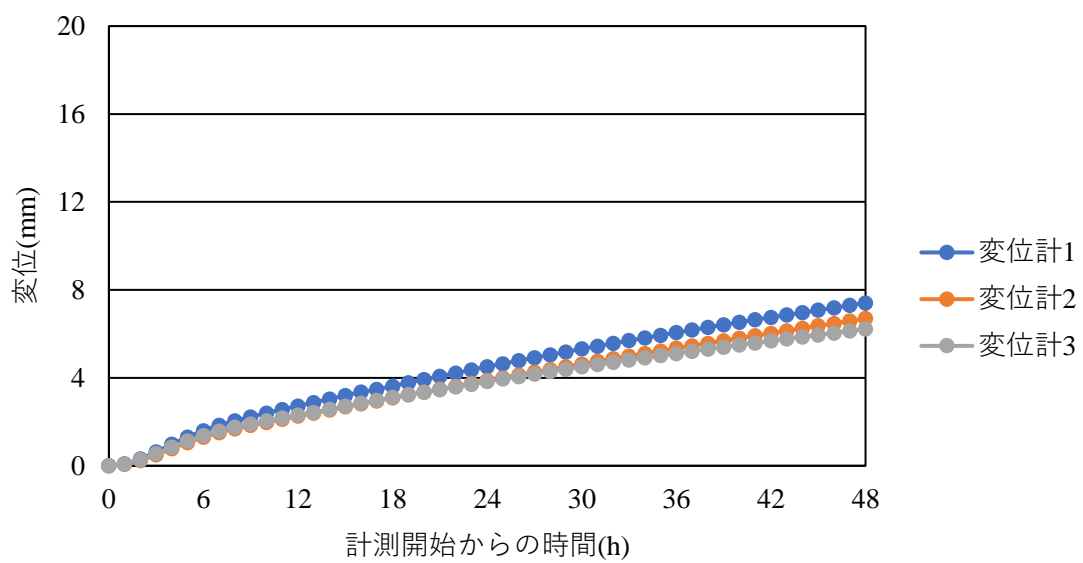


図 6.10 ケース 10 (ゆるみ領域大, 定着域小, GFRP ロックボルト CG22S)

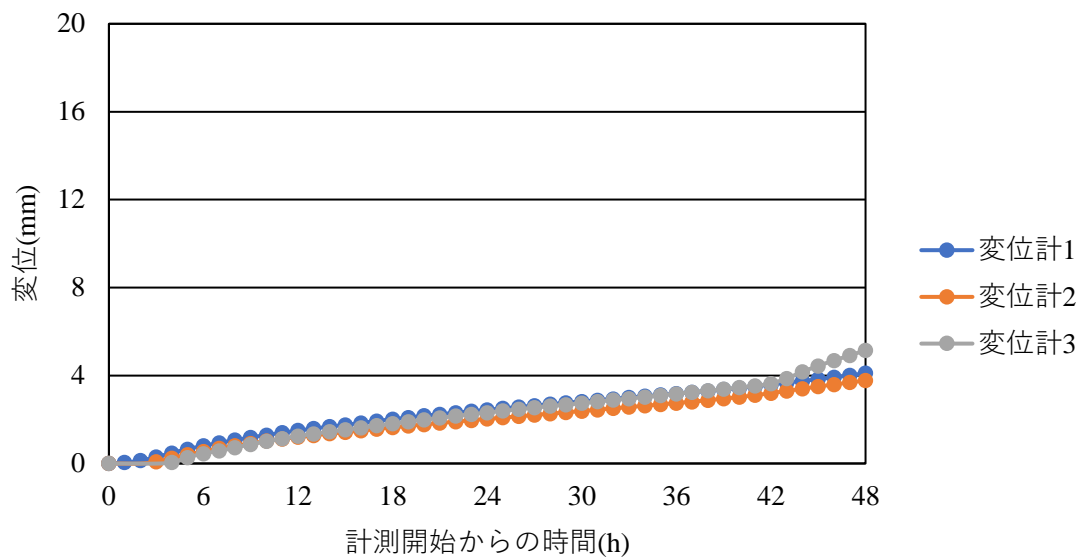


図 6.11 ケース 11 (ゆるみ領域小, 定着域大, 異形棒鋼 D22)

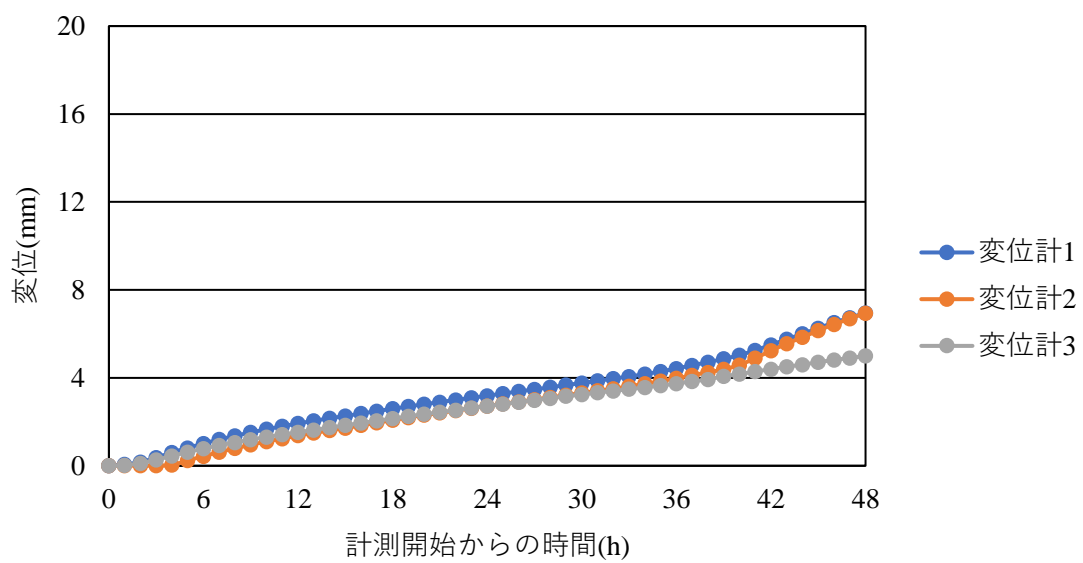


図 6.12 ケース 12 (ゆるみ領域小, 定着域大, GFRP ロックボルト CG22S)

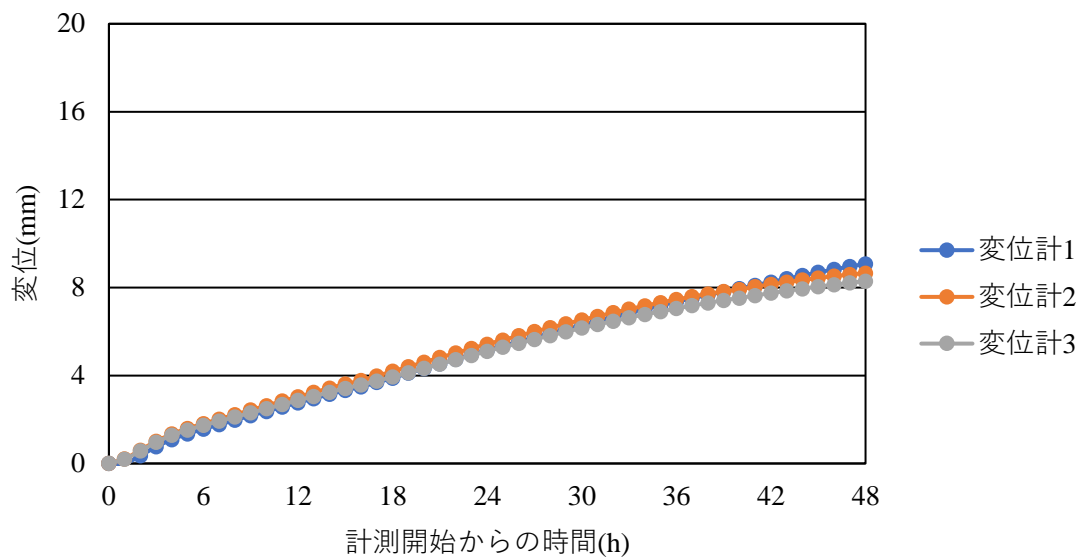


図 6.13 ケース 13 (ゆるみ領域大, 定着域大, 異形棒鋼 D22)

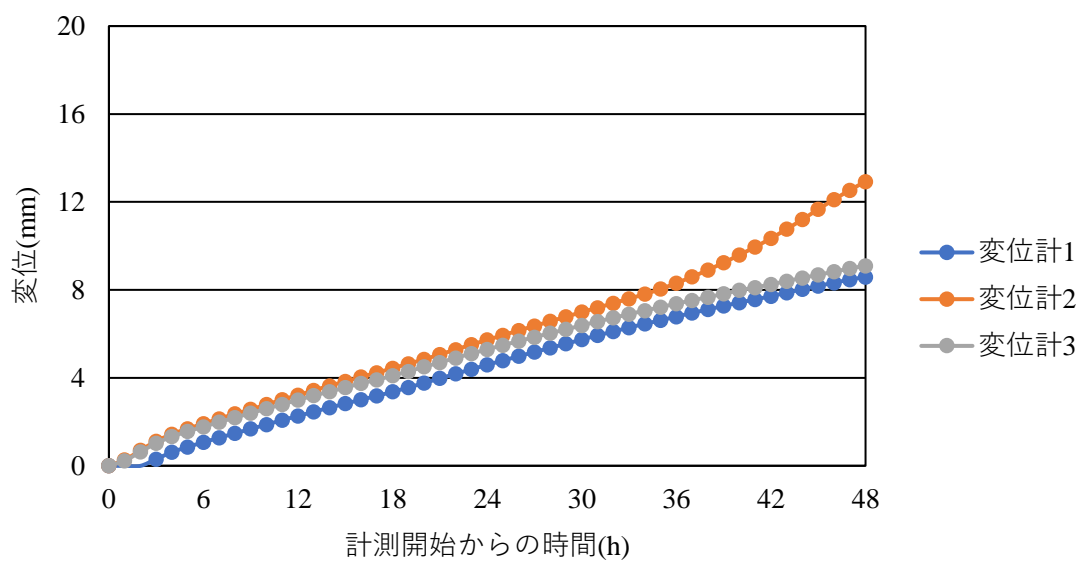


図 6.14 ケース 14 (ゆるみ領域大, 定着域大, GFRP ロックボルト CG22S)

6.2 ロックボルトに生じるひずみ結果

計測開始から 48 時間後までの各ケースのひずみの時間推移についてのグラフを以下の図 6.15 から図 6.26 に示す。また 48 時間後に各ゲージにおいて計測されたひずみを表 6.1 に示す。

なおケース 11 とケース 13 の鉄筋におけるケースでは、実験準備中にひずみゲージのリード線が切れてしまい、再度貼り付けることも困難であったため、No.7, No.8, No.10, No.12 に関しては計測ができなかった。

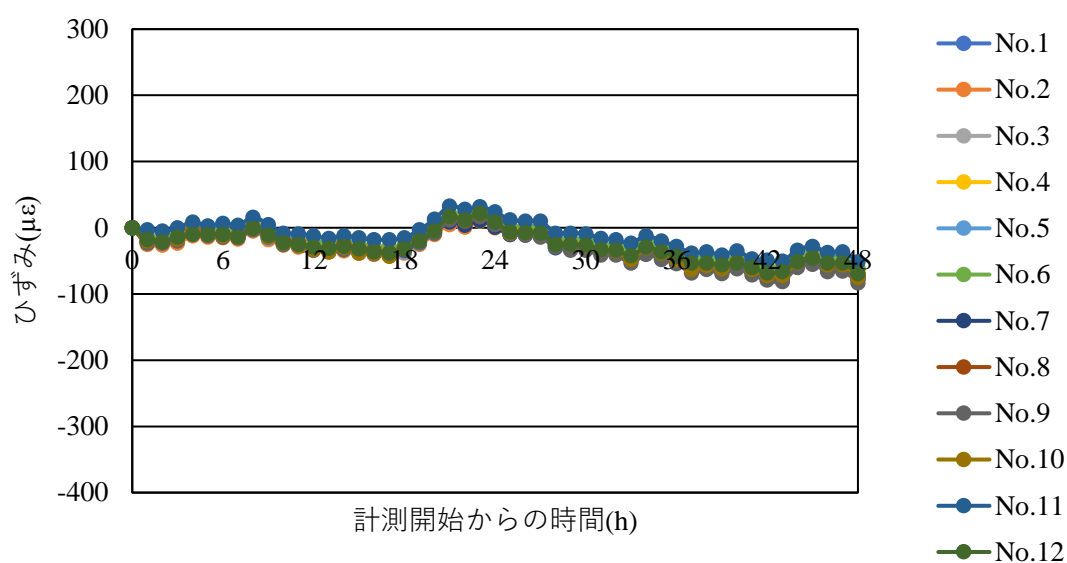


図 6.15 ケース 3 (ゆるみ領域小, 定着域無, 異形棒鋼 D22)

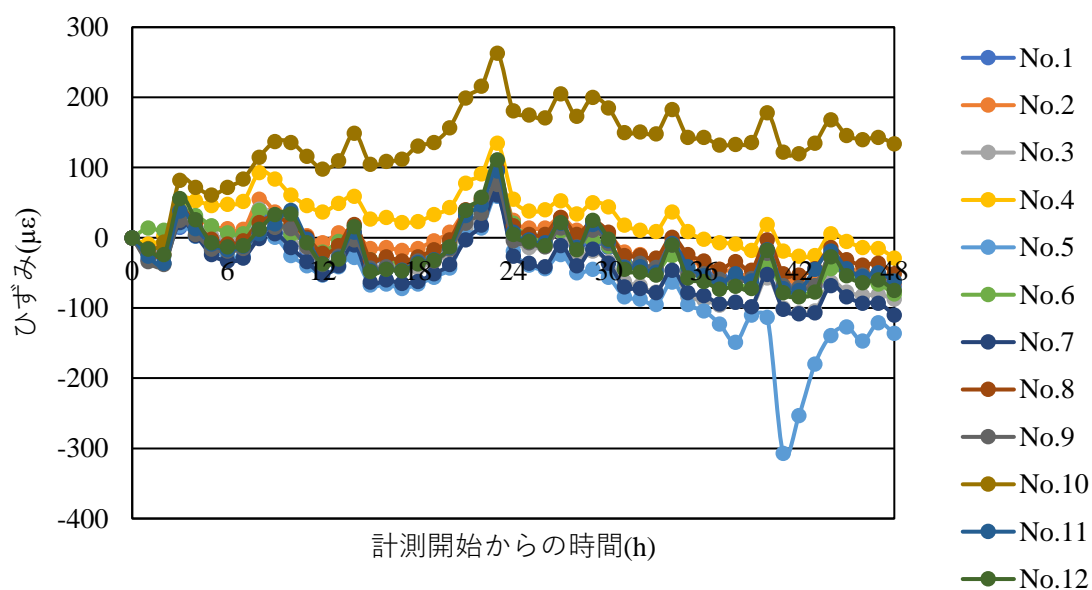


図 6.16 ケース 4 (ゆるみ領域小, 定着域無, GFRP ロックボルト CG22S)

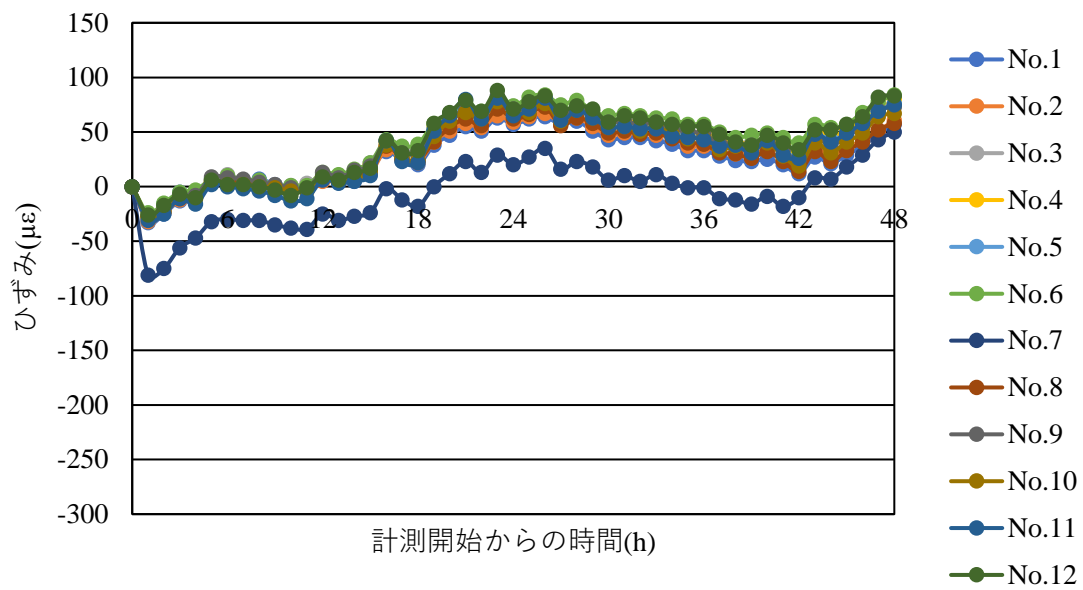


図 6.17 ケース 5 (ゆるみ領域大, 定着域無, 異形棒鋼 D22)

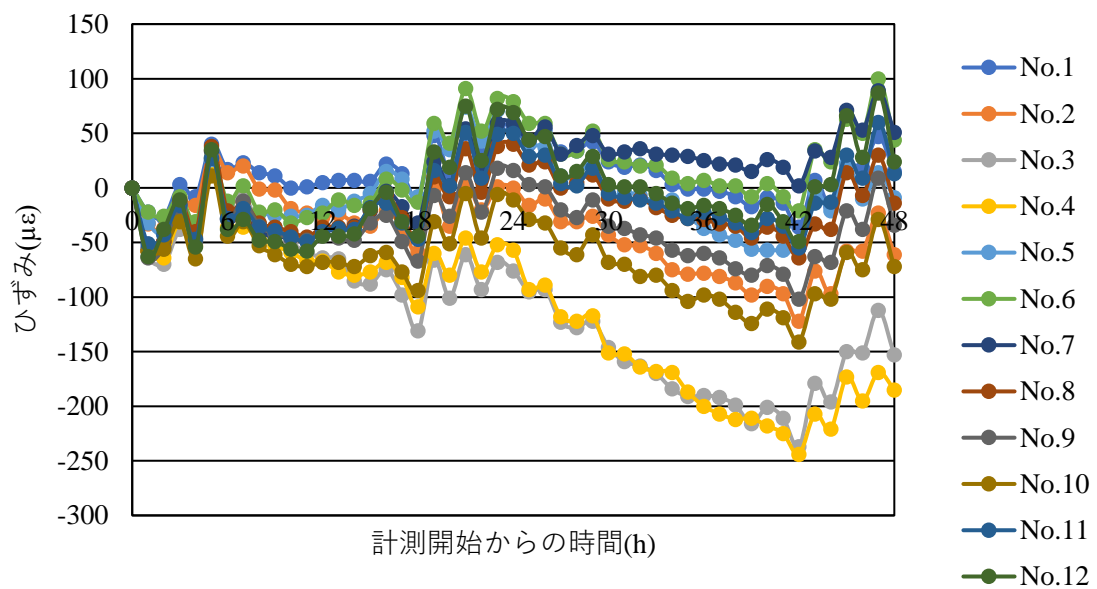


図 6.18 ケース 6 (ゆるみ領域大, 定着域無, GFRP ロックボルト CG22S)

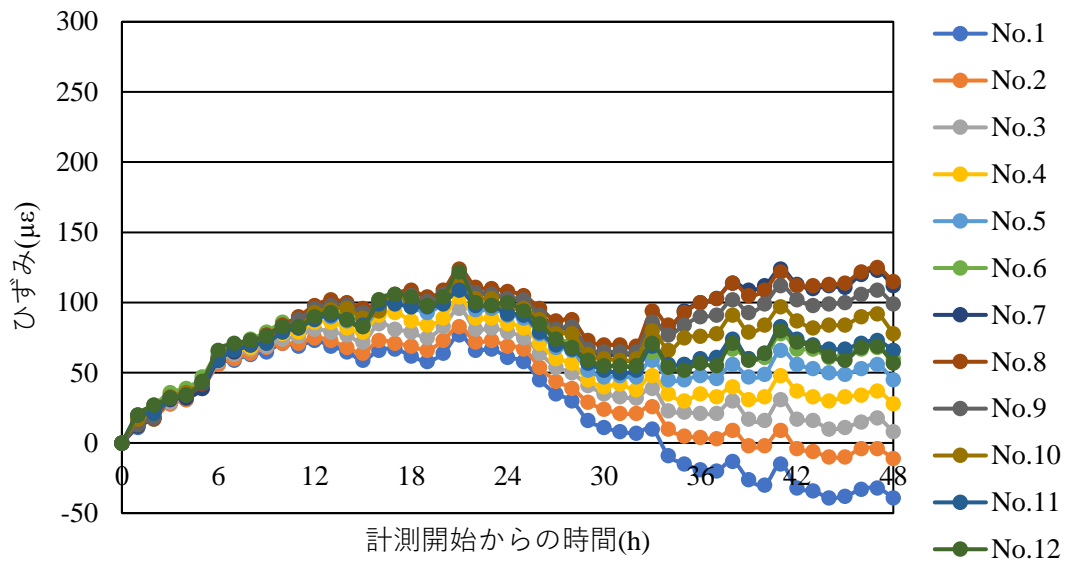


図 6.19 ケース 7 (ゆるみ領域小, 定着域小, 異形棒鋼 D22)

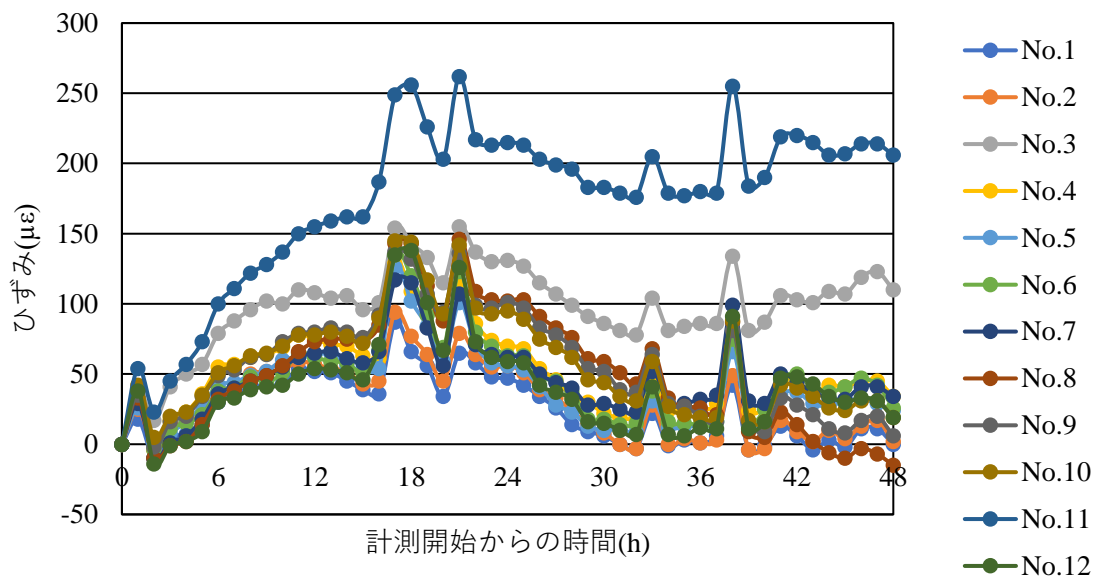


図 6.20 ケース 8 (ゆるみ領域小, 定着域小, GFRP ロックボルト CG22S)

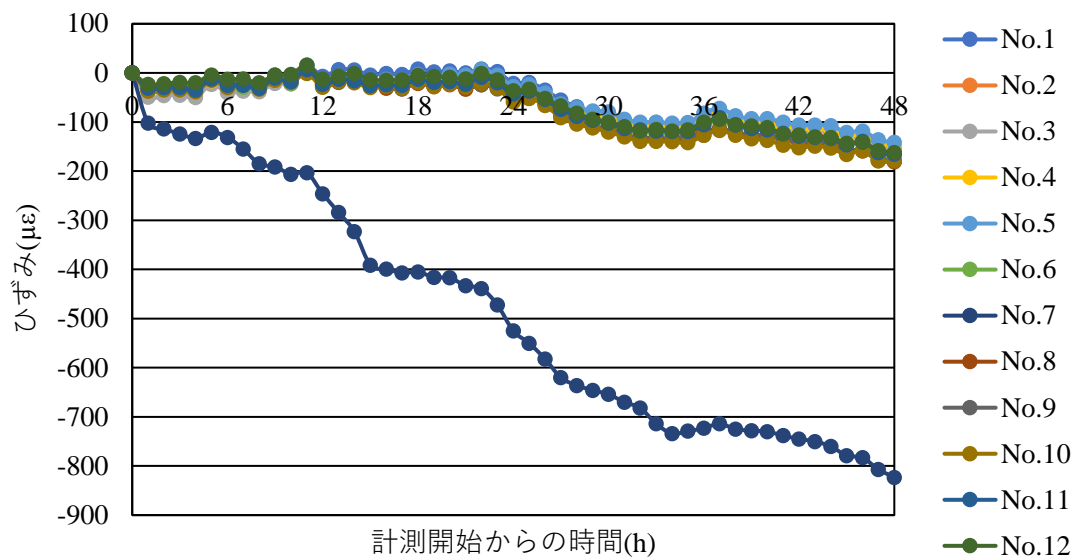


図 6.21 ケース 9 (ゆるみ領域大, 定着域小, 異形棒鋼 D22)

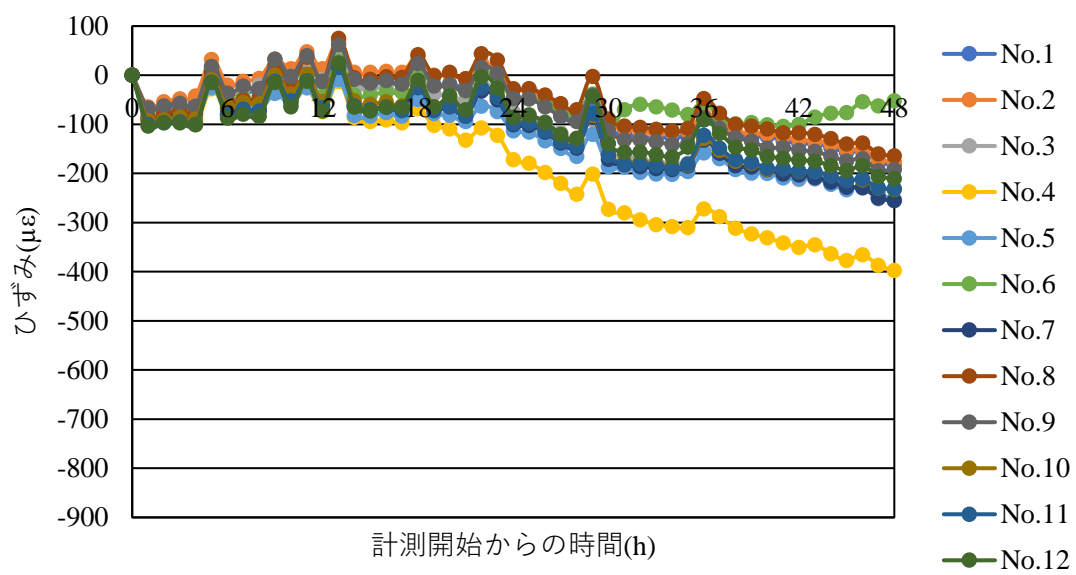


図 6.22 ケース 10 (ゆるみ領域大, 定着域小, GFRP ロックボルト CG22S)

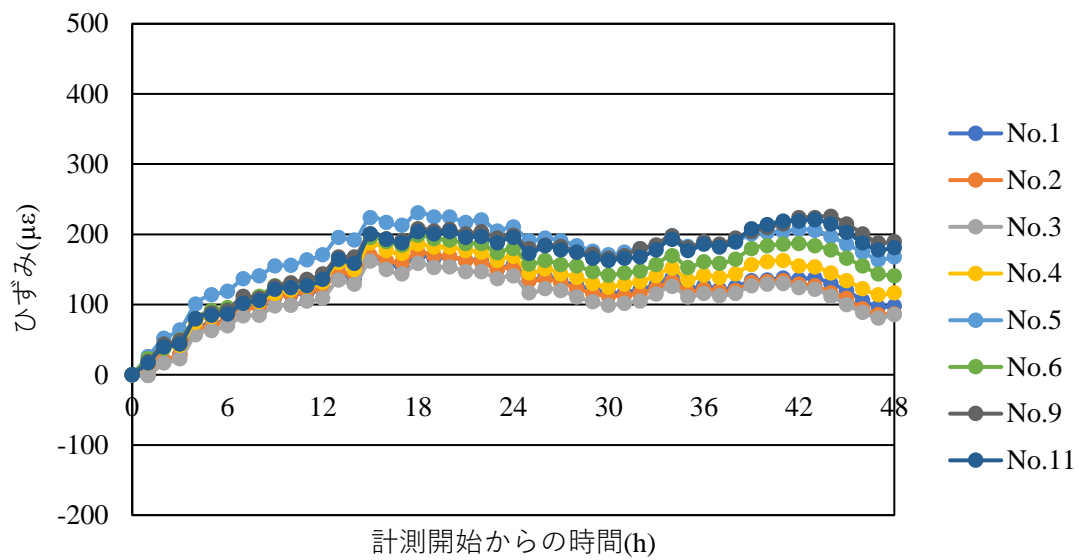


図 6.23 ケース 11 (ゆるみ領域小, 定着域大, 異形棒鋼 D22)

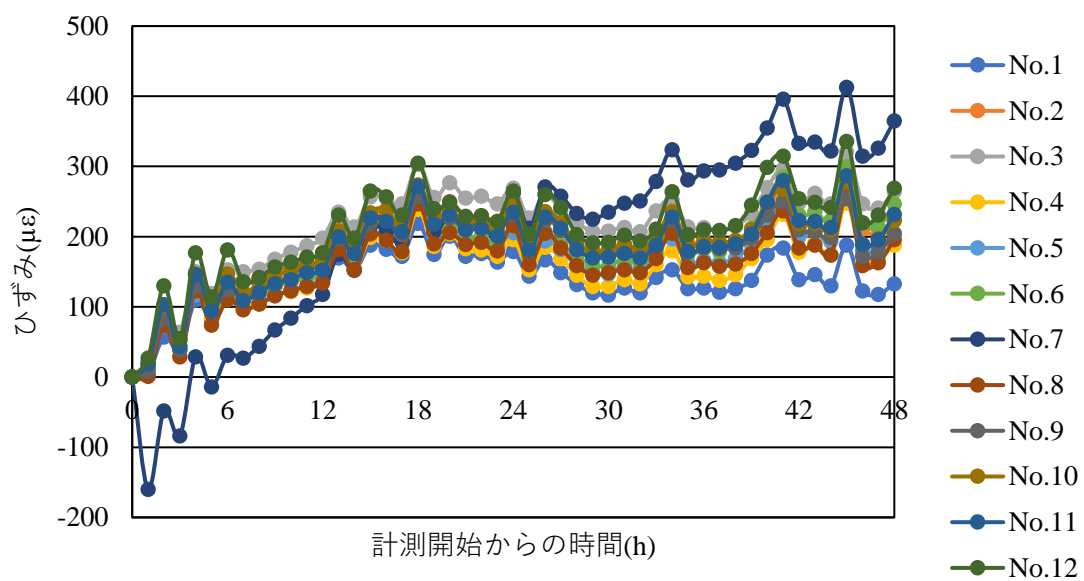


図 6.24 ケース 12 (ゆるみ領域小, 定着域大, GFRP ロックボルト CG22S)

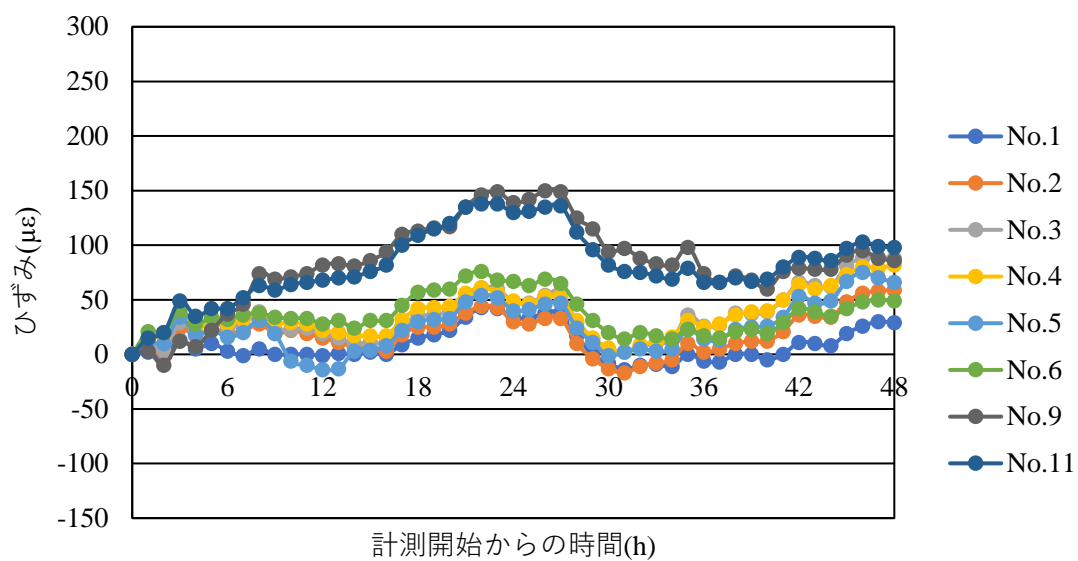


図 6.25 ケース 13 (ゆるみ領域大, 定着域大, 異形棒鋼 D22)

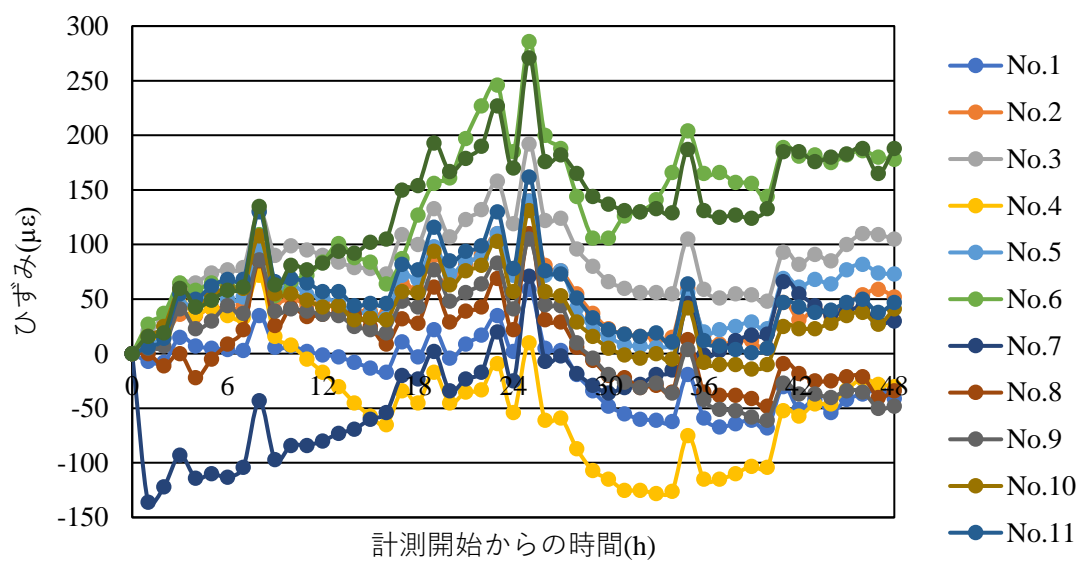


図 6.26 ケース 14 (ゆるみ領域大, 定着域大, GFRP ロックボルト CG22S)

表 6.1 48 時間後各ひずみゲージにおいて計測されたひずみ

| | 先端 | ひずみゲージ位置 | | | | |
|-------------------|------|----------|------|-------|-------|-------|
| | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 |
| | No.7 | No.8 | No.9 | No.10 | No.11 | No.12 |
| ケース 3 | -70 | -70 | -61 | -61 | -77 | -62 |
| | -77 | -75 | -83 | -75 | -51 | -69 |
| ケース 4 | -68 | -64 | -87 | -29 | -136 | -80 |
| | -110 | -51 | -61 | 134 | -62 | -75 |
| ケース 5 | 57 | 61 | 76 | 80 | 76 | 84 |
| | 50 | 58 | 73 | 67 | 75 | 83 |
| ケース 6 | 15 | -61 | -153 | -185 | -9 | 44 |
| | 51 | -14 | -34 | -72 | 13 | 24 |
| ケース 7 | -39 | -11 | 8 | 28 | 45 | 60 |
| | 112 | 115 | 99 | 78 | 66 | 57 |
| ケース 8 | 0 | 2 | 110 | 34 | 24 | 26 |
| | 34 | -15 | 6 | 19 | 206 | 19 |
| ケース 9 | -153 | -163 | -154 | -147 | -141 | -168 |
| | -823 | -181 | -178 | -179 | -165 | -162 |
| ケース 10 | -183 | -176 | -254 | -397 | -253 | -52 |
| | -255 | -164 | -192 | -232 | -231 | -210 |
| ケース 11 | 98 | 87 | 86 | 117 | 168 | 141 |
| | - | - | 190 | - | 181 | - |
| ケース 12 | 133 | 223 | 264 | 188 | 205 | 247 |
| | 365 | 196 | 204 | 223 | 232 | 269 |
| ケース 13 | 29 | 59 | 88 | 82 | 66 | 49 |
| | - | - | 86 | - | 98 | - |
| ケース 14 | -41 | 52 | 105 | -30 | 73 | 178 |
| | 30 | -34 | -48 | 41 | 47 | 188 |
| 単位： $\mu\epsilon$ | | | | | | |

6.3 実験結果の考察

6.3.1 平均変位量

以下に全ケースの平均変位量のグラフ(図 6.27)と各条件での平均変位量グラフ(図 6.28 から図 6.31)を示す. なお, ケース 3 の変位計 2, ケース 5 の変位計 1, ケース 7 の変位計 2, ケース 8 の変位計 1・2, ケース 11 の変位計 3, ケース 12 の変位計 1・2, ケース 14 の変位計 2 に関しては平均を計算するに当たって変位の増加の傾向が他と異なったため, 含まれていない.

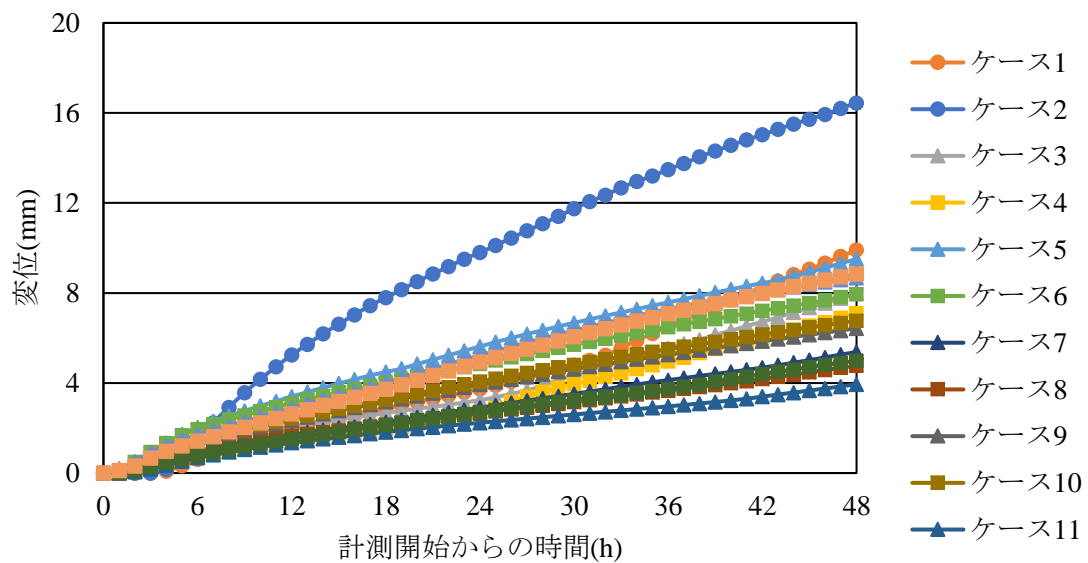


図 6.27 全ケース平均変位量の時間推移まとめ

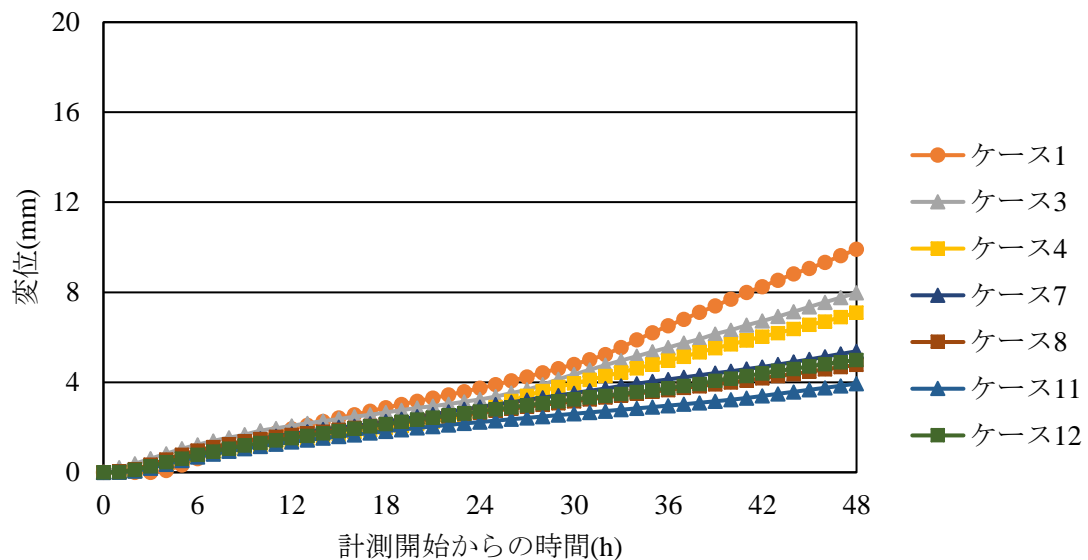


図 6.28 ゆるみ領域小の平均変位量

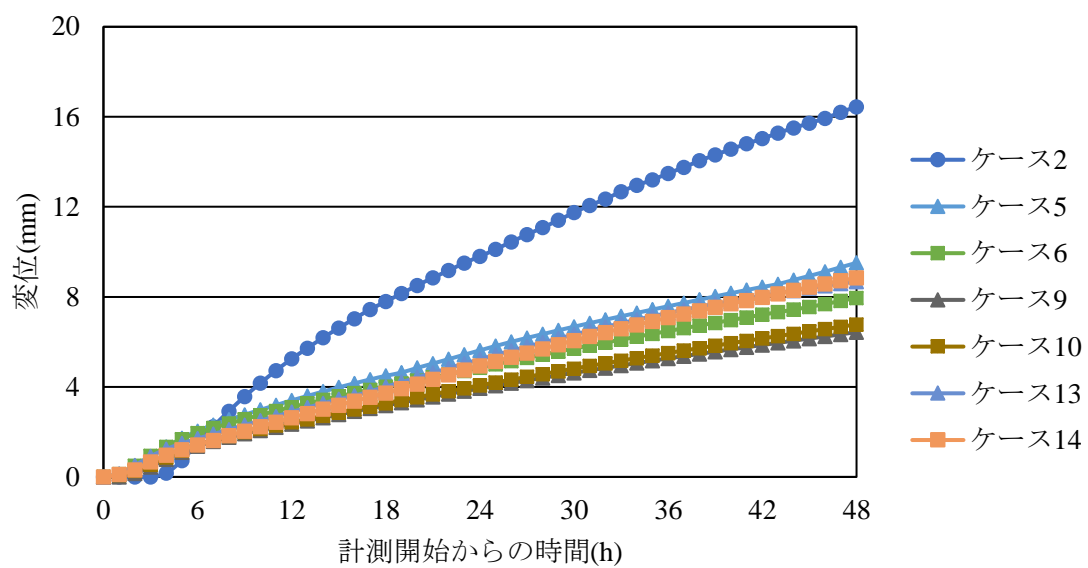


図 6.29 ゆるみ領域大の平均変位量

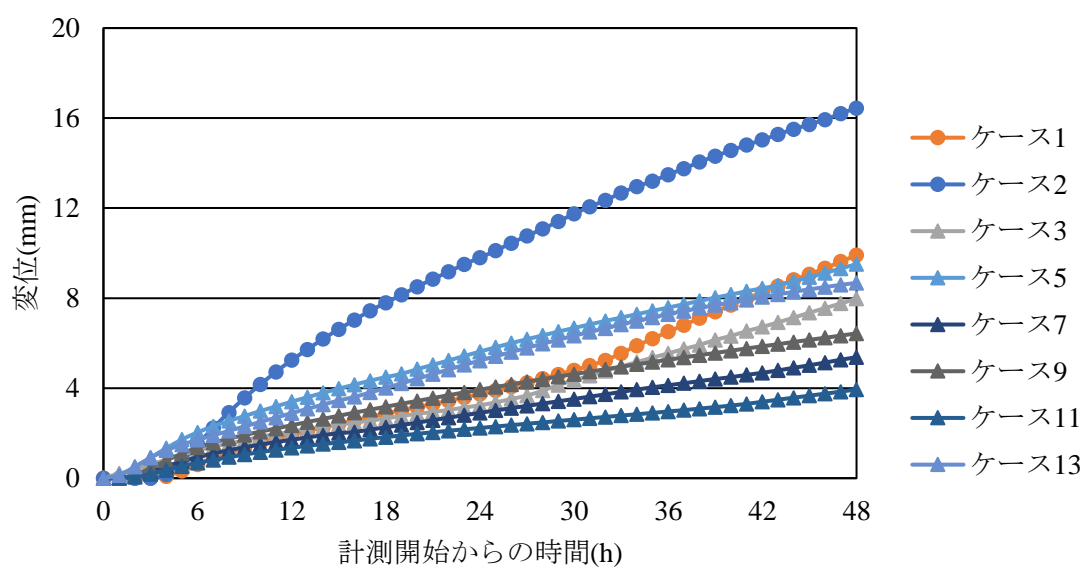


図 6.30 ロックボルト無と異形棒鋼 D22 の平均変位量

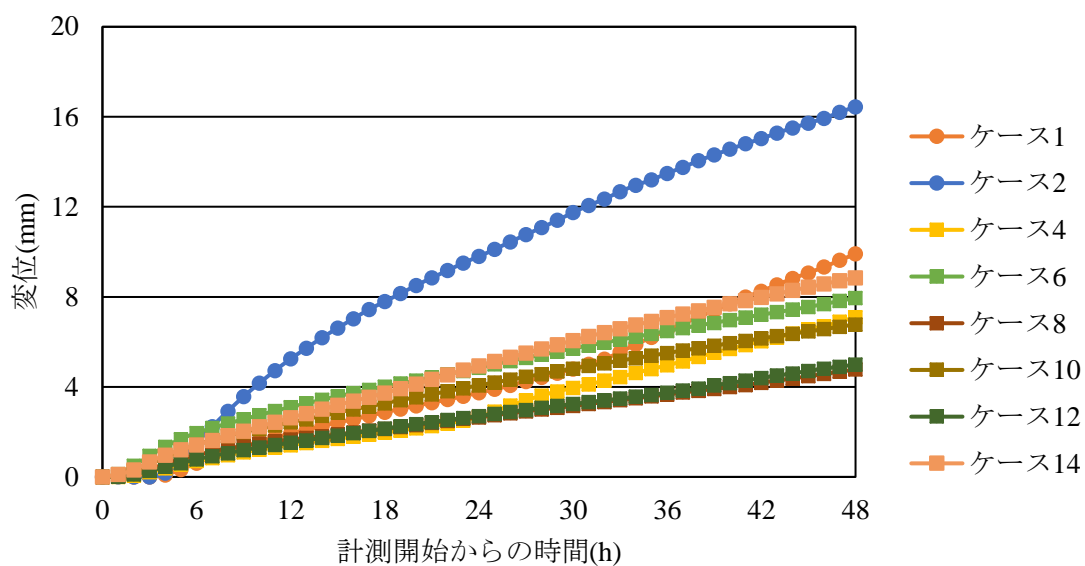


図 6.31 ロックボルト無と GFRP CG22S の平均変位量

上記の図より，どのケースにおいてもロックボルトを設置することで変位抑制効果を発揮し，変位が減少していることが分かる．

また 48 時間後の平均変位量の表を表 6.2 に，ロックボルトの種類ごとの縦棒グラフを図 6.32 と図 6.33 に示す．

表 6.2 48 時間後の全ケース平均変位量まとめ

| | 定着域無 | | 定着域小 | 定着域大 |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| ゆるみ 領域 小 | <u>ケース 1</u> RB 無 9.91 | <u>ケース 3</u> D22 7.98 | <u>ケース 7</u> D22 5.38 | <u>ケース 11</u> D22 3.95 |
| | | <u>ケース 4</u> CG22S 7.10 | <u>ケース 8</u> CG22S 4.78 | <u>ケース 12</u> CG22S 5.00 |
| ゆるみ 領域 大 | <u>ケース 2</u> RB 無 16.45 | <u>ケース 5</u> D22 9.51 | <u>ケース 9</u> D22 6.44 | <u>ケース 13</u> D22 8.68 |
| | | <u>ケース 6</u> CG22S 7.96 | <u>ケース 10</u> CG22S 6.78 | <u>ケース 14</u> CG22S 8.85 |
| 単位：mm | | | | |

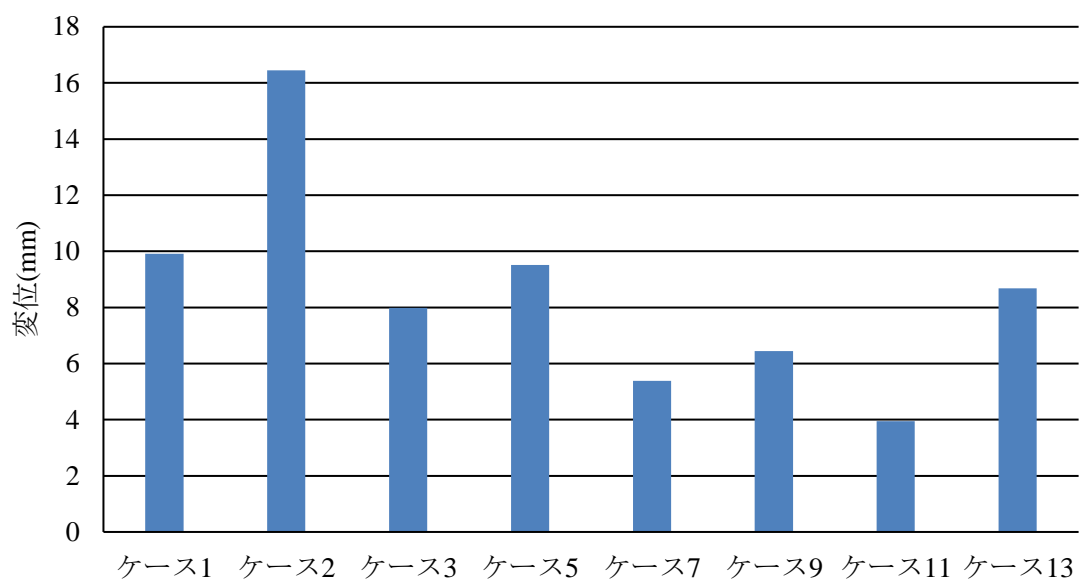


図 6.32 異形棒鋼平均変位量

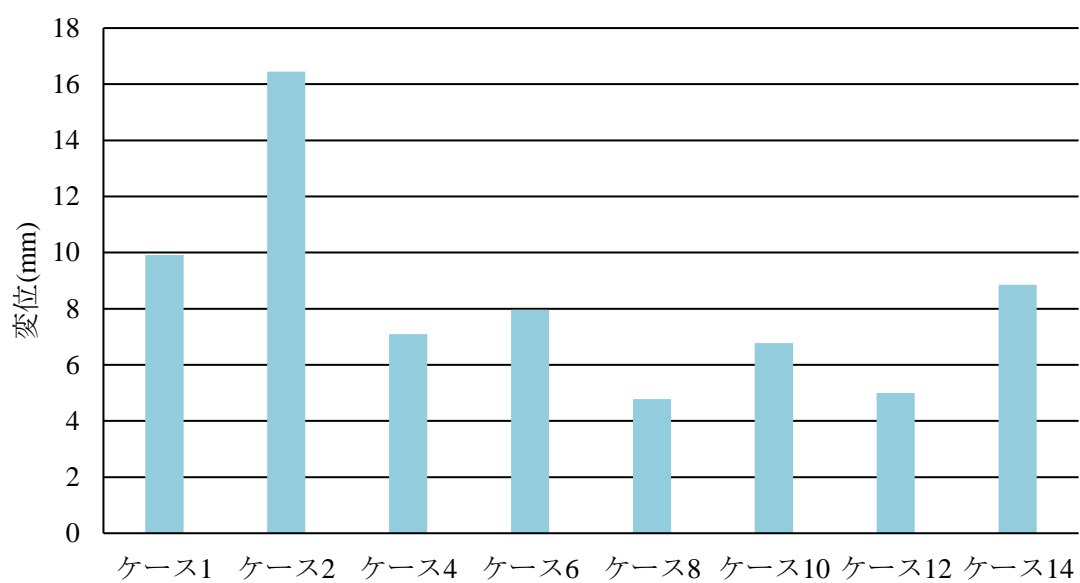


図 6.33 GFRP 平均変位量

表 6.2 と図 6.31 より、ケース 7, 9, 11, 13 を見てみると異形棒鋼は定着域がある場合にロックボルトがないケースと比べて、ケース 7 では約 5 割減、ケース 9 では約 6 割減、ケース 11 では約 6 割減、ケース 13 では約 5 割減と、大きな変位抑制効果を発揮することが確認された。しかし、定着域の大小で比較すると、ゆるみ領域が小さいケース 7, 11 では定着域の大きいケース 11 の方が減少量が大きく、効果が高いが、ゆるみ領域が大きいケース 9, 13 では定着域の小さいケース 9 の方が減少量が大きく、効果が高い結果となった。このことから定着域の大小は変位抑制効果の発揮に関係が薄いこと可能性が考えられる。しかし、定着がない場合であるケース 3, 5 について、それぞれ約 2 割減、4 割減と定着域の有無による変位抑制効果の差が大きく出ている。そのため異形棒鋼をロックボルトとして使用する場合は、定着を十分に確保して施工することが重要であると考えられる。定着の大小による効果の差については可能性が薄いとしたが、今後異なる検討などを通して明らかにしていくべきであると考ええる。

これに対し表 6.2 と図 6.33 より、GFRP は定着がないケース 4, 6 においてもロックボルトがないケースと比較すると約 3 割減、5 割減と、ある程度の変位抑制効果があることが確認できる。また定着域があるケース 8, 10, 12, 14 においてもロックボルトがないケースと比較すると、それぞれ約 5 割減、6 割減、5 割減、5 割減と、一定程度の変位抑制効果が発揮されていることが確認できる。しかし定着域の有無や大小で比較すると、異形棒鋼に比べると定着域の有無や大小による変位量の差は小さくなく、変位抑制効果の差はあまり見られないことが確認された。よって GFRP ロックボルトの変位抑制効果の発揮には定着域の有無、大小は関連しておらず、今回の実験の条件下においてはどの条件においてもある程度の変位抑制効果を発揮すると考えられる。これよりも大きな変位抑制効果が期待できるかは実験を繰り返し行うか別の検討をして明らかにする必要があると考ええる。

以上より、異形棒鋼は定着の有無による変位抑制効果の差が大きいことが分かり、大きな変位抑制効果を発揮させるためには定着を確保して施工することが重要であることが明らかになった。しかし定着の大小によっては効果の明確な差異が明らかにならなかったため、さらなる検討によって明らかにすべきであると考ええる。GFRP は定着の有無、大小によって変位抑制効果の明らかな差はないことが確認され、定着の有無や大小に関係なく効果を発揮することが明らかになった。しかし、変位の大幅な抑制を期待できるかどうかはさらなる検証が必要であると考えられる。

6.3.2 ロックボルトに生じるひずみ

以下に表 6.1 の結果を平均し整理した表 6.3, 48 時間後のロックボルトごとの平均ひずみの分布を図 6.34 と図 6.35 に示す.

表 6.3 48 時間後の各点の平均ひずみ

| | 先端から | ひずみゲージ位置 | | | | |
|--------|------|----------|------|------|------|------|
| | 1cm | 4cm | 7cm | 10cm | 13cm | 16cm |
| ケース 3 | -74 | -73 | -72 | -68 | -64 | -66 |
| ケース 4 | -89 | -58 | -74 | -29 | -99 | -78 |
| ケース 5 | 54 | 60 | 75 | 74 | 76 | 84 |
| ケース 6 | 33 | -38 | -94 | -129 | 2 | 34 |
| ケース 7 | 37 | 52 | 54 | 53 | 56 | 59 |
| ケース 8 | 17 | -7 | 58 | 27 | 115 | 23 |
| ケース 9 | -153 | -172 | -166 | -163 | -153 | -165 |
| ケース 10 | -219 | -170 | -223 | -315 | -242 | -131 |
| ケース 11 | 98 | 87 | 138 | 117 | 175 | 141 |
| ケース 12 | 249 | 210 | 234 | 206 | 219 | 258 |
| ケース 13 | 29 | 59 | 87 | 82 | 82 | 49 |
| ケース 14 | -6 | 9 | 29 | 6 | 60 | 183 |

単位 : $\mu\epsilon$

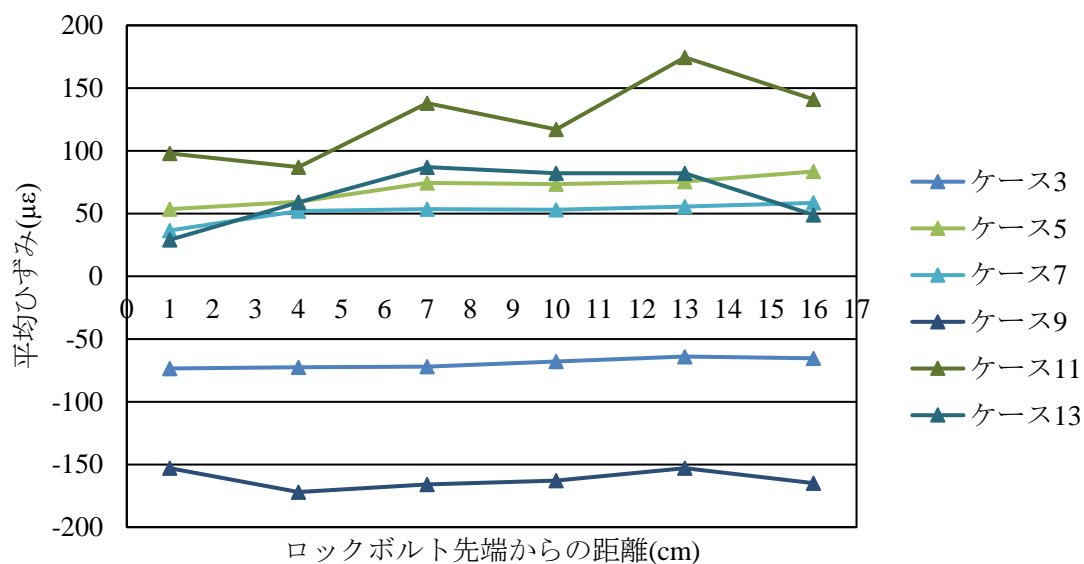


図 6.34 48 時間後平均ひずみ分布 (異形棒鋼)

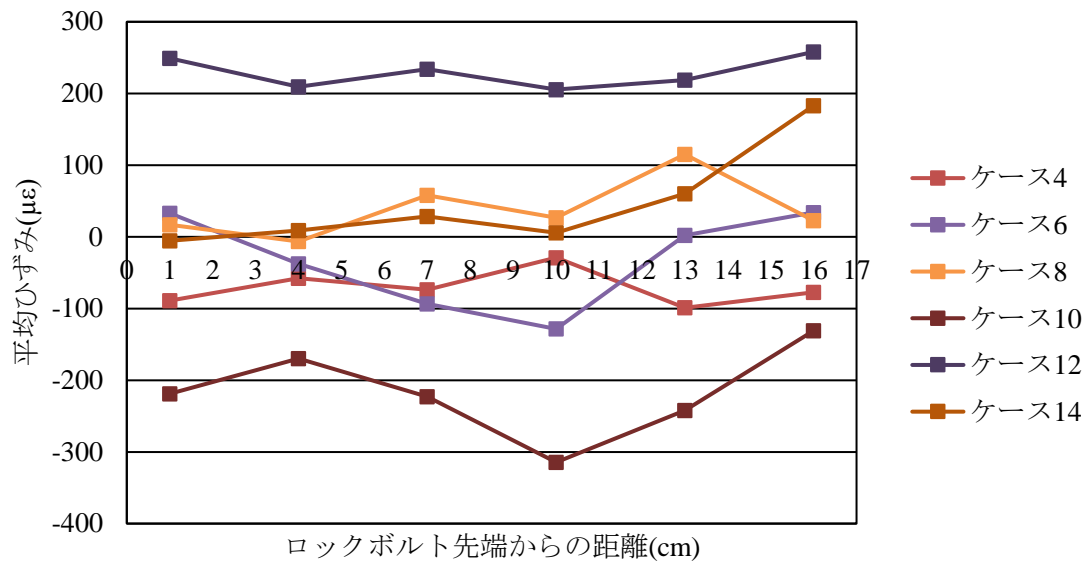


図 6.35 48 時間後平均ひずみ分布 (GFRP)

これらの表 6.3, 図 6.34, 6.35 より, ケース 3, 4, 6 の一部, 9, 10 では圧縮ひずみが生じる部分があることが確認される. ケース 3, 4, 6 は定着域がないケースであるので, ロックボルトが固定されず模擬地山材料の膨張による圧縮量によって圧縮ひずみが生じた可能性があると考えられる. よってロックボルトの性能に圧縮に関する何らかの性能規定が必要ではないかと考えられる. しかしケース 5 ではどの場所においても引張ひずみが生じているため, 圧縮ひずみが生じる地山条件であるのかを確認するために, 実験の再現性も考慮した検討が必要であると考ええる.

一方ケース 9, 10 は定着域があるケースのため引張ひずみが生じると考えられるが, 圧縮ひずみが生じている. このケースにおいても圧縮ひずみが生じる地山条件であるのか否かを確認するために, 上記と同様, 再現性を含めて実験する必要があると考えられる.

第 7 章 結論及び今後の課題

7.1 結論

本研究ではロックボルトの性能に関して、せん断力や圧縮力に関する性能などの引張耐力以外に求められる性能指標を明らかにし、ロックボルトの合理的な設計・施工法に資する性能の提案を目的に、ゆるみ領域を模擬する模擬地山材料、定着域を模擬するドライモルタル、2種類のロックボルトを使用した模型実験を行い、ロックボルトの基礎的な力学的挙動についてについて検討を行った。

実験結果より、GFRP は本実験の条件下では変位抑制効果が一定程度発揮されることが確認された。また異形棒鋼は定着域の大小に関わらず、定着がある場合に変位抑制効果を発揮することが確認された。このことから異形棒鋼をロックボルトとして使用する際には定着を確保することが重要であると考えられる。またひずみに関しては、定着が期待できない地山で圧縮ひずみが生じたことから、ロックボルトに圧縮力が生じる可能性があることも確認された。そのため、ロックボルトに圧縮に関する何らかの性能が必要であると考えられる。

7.2 今後の課題

本研究では、模型実験を通して異形棒鋼と GFRP の変位抑制効果の違いについて明らかになったが、この変位抑制効果とロックボルトの性能指標の関連性については明確にできなかった。そのためこの関連性を検討する必要があると考えられる。

またひずみに関しては、引張ひずみが生じると考えられた定着域が存在するケースにおいて圧縮ひずみが生じたケースが存在したため、圧縮力を生じる条件下を含め、種々の地山状態や定着状況の再現をしたうえで複数回の実験を行うことが必要であると考えられる。

また、実際のロックボルト施工時に設置されているベアリングプレートを模擬した鋼製上蓋等を使用して、拘束の影響を考慮した検討をするなど、より実際の条件に近づけた上で力学的挙動に関する検証が必要であることに加え、今回使用した 2 種類のロックボルトの引抜き試験による引抜き特性も考慮しながら力学的性能についての検討を深度化させ、ロックボルトの性能規定を明確にし、ロックボルトの合理的な設計・施工に資する性能の提案をしていきたいと考える。

謝辞

本論文は首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 砂金伸治 教授のご指導のもとにとりまとめたものである。同博士には本研究を進めるにあたり多くのご指導，ご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

また，首都大学東京 学長特任補佐 西村和夫理事には本研究を進めるにあたり多くのご指導，ご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

また，首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 上野敦 准教授，同じく 吉嶺充俊 准教授，大野健太郎 助教授には，模擬地山材料作製や模擬地山材料の材料特性の把握に関して適切なご助言，ご指導をいただきました。深く御礼申し上げます。

そして，本研究を進めるにあたり，国立研究開発法人土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム 日下 上席，同じく森本 主任研究員，前田 交流研究員には，模型実験の実施に関して適切なご助言やご指導，また計測機器のご提供などご鞭撻を賜りました。ここに深くご御礼申し上げます。

また，同じく本研究を進めるにあたり，清水建設株式会社 淡路様，同じく 小池様，同社高取山トンネル建設作業所 垣見様，同じく 福田様には模型実験の実施に関して適切なご助言やご指導，また実験器具や材料の手配など，ご鞭撻を賜りました。ここに深くご御礼申し上げます。

また，同じく本研究を進めるにあたり，株式会社ケー・エフ・シー 岡部様には実験材料の手配などご鞭撻を受け賜りました。ここに深くご御礼申し上げます。

さらに同大学トンネル・地下空間研究室とともに籍を置いた，井上洸志氏，森田倫先氏，石井祥旭氏，岡村夏之助氏，永田哲也氏，野原雅孝氏，山西雄大氏，篠田かれん氏，倉橋和希氏，石川諒氏，品川由芽氏，松本卓馬氏の惜しげないご協力があったことに対し，ここに深く感謝の意を表します。

最後に，これまで自分の思う道を進むことに対し，温かく見守り，辛抱強く支援して下さった家族に対して深く感謝の意を表して，謝辞とさせていただきます。